

N° d'ordre : 40742

Université des sciences et technologies de Lille

École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur de l'Université des sciences et technologies de Lille

Spécialité : Microondes et Microtechnologies

le 16 Décembre 2011

Par

Romain CRUNELLE

Etude, conception et réalisation de transitions verticales coaxiales pour une intégration hétérogène 3D de microsystèmes en gamme millimétrique

Composition du jury :

Président	GILLES DAMBRINE	Professeur, Université de Lille1
Directeur	NATHALIE ROLLAND	Professeur, Université de Lille 1
Rapporteurs	MARISE BAFLEUR	Directeur de Recherche CNRS , LAAS
	LAURENT DUSSOPT	Ingénieur HDR, CEA-LETI
Examineurs	ANDREIA CATHELIN	Ingénieur, ST Microelectronics France
	PASCAL ANCEY	Ingénieur, ST Microelectronics France
Invité	BARBARA BONNET	Ingénieur, Thales Alenia Space, France

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), à l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies (IEMN), au sein du département Hyperfréquences et Semiconducteurs, dirigé par le Professeur P.A. Rolland.

Je remercie Monsieur Gilles Dambrine, Professeur d'Université et Directeur Adjoint de l'IEMN, de me faire l'honneur de présider le jury.

Je remercie Madame Nathalie Rolland, Professeur d'Université, pour avoir accepté de diriger cette thèse. Ses compétences scientifiques et ses discussions enrichissantes m'ont beaucoup apporté.

Je remercie Monsieur Paul-Alain Rolland, Professeur d'Université, responsable du groupe CSAM, pour le soutien permanent qu'il a pu m'apporter.

Je remercie sincèrement Madame Marise Bafleur, Directeur de Recherche au CNRS, du LAAS, et Monsieur Laurent Dussopt, Ingénieur HDR au CEA-LETI, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de ce travail.

Je tiens à remercier Madame Andreia Cathelin, Ingénieur chez ST-Microelectronics, pour sa participation à ce jury de thèse. J'en profite pour remercier ST-Microelectronics d'avoir financé ce projet durant trois années.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à Madame Barbara Bonnet, Ingénieur chez Thales Aliena Space, pour sa participation à ce jury de thèse.

Je remercie également Monsieur Pascal Ancy ; Ingénieur chez ST-Microelectronics, d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Si ce travail a pu être mené à terme, c'est aussi grâce à l'amitié et la bonne humeur que m'ont témoigné tous les membres du groupe CSAM. Je tiens à remercier tous les membres de l'équipe que j'ai pu côtoyer : Barbiche, Le Gros Alex, Michou, Zébulon, Tristan, les Christophes², Kim, Farid, Benoît, Aymeric, Carlito, Yoann, Laurent, Chavrou, Rédha, Li et Chen, le petit Alex, Seonho, Kouakou, et tous ceux que j'oublie involontairement.

Je tiens également à remercier Pascal Tilmant, Dmitri Yarekha, Karine Blary, Christophe Boyaval, Hermance Desré, Christiane Legrand, Didier Vandermoere, pour leur aide sur la centrale de technologie. Je remercie Madame Flament, qui m'a toujours aidé dans l'organisation et les tâches administratives.

Un grand merci aussi à Philou, grâce à qui j'ai toujours pu suivre les résultats du LOSC.

Enfin, un grand merci à ceux qui, même si les notions expliquées ici leur semblent étranges, m'ont toujours supporté et motivé durant ces années. Merci à mes parents, Olivier et Clément, mes deux frères, ainsi que mes grands parents, qui ont toujours essayé de s'intéresser à ces sujets lointains...

RESUME

L'atteinte prévisible des limites de la loi de Moore dans les dix prochaines années poussent les concepteurs de systèmes de communication à intégrer le maximum de fonctionnalités dans des modules 3D de plus en plus petits, incluant des capteurs, de l'intelligence embarquée, des modules radio avec leurs antennes, (Approche More than Moore). On passe donc du concept de SoC (System-on-Chip) au concept de SiP (System-in-Package) pouvant intégrer des SoC mais offrant d'autres fonctionnalités au niveau de la perception de l'environnement, de la communication, de la reconfigurabilité et de la possibilité d'auto-organisation en réseau ad-hoc, tout en minimisant le volume et la consommation énergétique.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent ces travaux de thèse, qui présentent cette technologie d'intégration hétérogène (System-In-Package) miniature, faible coût associant des MEMS RF à des circuits MMIC actifs et des antennes intelligentes pour établir des communications robustes en gamme millimétrique. Pour cela, nous proposons, par le projet SIPCOM, la réalisation et le test d'un module radio ultra compact et performant en gamme millimétrique grâce à une approche d'« intégration hétérogène ».

Ce module intégrera toutes les fonctions nécessaires pour la réalisation d'un émetteur 60 GHz : le réseau d'antennes, les déphaseurs à base de MEMS pour assurer l'agilité du faisceau, le convertisseur DC/DC pour alimenter les MEMS, un FPGA (du commerce) pour commander la reconfigurabilité du module radio et les circuits mise en veille/réveil du module pour une consommation minimale. Dans ce contexte, ces travaux de thèse visent à développer la technologie de mise en boîtier et les interconnexions et transitions verticales.

Au cours de ce manuscrit, nous proposons une nouvelle approche de transitions verticales, les TSCV (Through Silicon Coaxial Vias). Transition verticale basée sur le modèle coaxial, utilisant du benzocyclobutène (BCB) en guise de matériau diélectrique, son étude, son développement, et l'évolution de la structure sont présentés. Du fait de sa nature, cette transition coaxiale offre tous les avantages à la mise en boîtier à haute densité d'intégration, avec une totale isolation électromagnétique par rapport au substrat, et donc une totale indépendance quant à la nature du substrat, un rayonnement électromagnétique parasite ultra faible et, par les propriétés du BCB, des pertes électromagnétiques ultra faibles en bande millimétrique. Nous détaillons également le procédé de réalisation technologique et son évolution, qui permet la fabrication et le test de ces structures.

ABSTRACT

Achieving predictable limits of Moore's Law over the next ten years, communication systems designers try to integrate a maximum of functionality into smaller and smaller 3D modules, including sensors, embedded intelligence, radio modules with their antenna (Approach More than Moore). So we go from the concept of SoC (System-on-Chip) to the concept of SiP (System-in-Package) that can integrate SoC but offering more features concerning the environmental perception, communication, reconfigurability and the possibility of self-organization in ad-hoc network, while minimizing the volume and energy consumption.

This thesis was performed in this context and presents this heterogeneous integration technology (System-in-Package), miniature, low cost RF MEMS, combining MMIC circuits and smart antennas to establish communications in millimeter range. For this, by SIPCOM project, we propose the realization of an ultra compact radio module and efficient testing in millimeter range thank to “heterogeneous integration” approach.

This module will integrate all the functions necessary for the implementation of a 60 GHz transmitter: network antennas, phase shifters based on MEMS to ensure the agility of the beam, the DC / DC converter to power the MEMS, an FPGA (trade) to control the reconfigurability of the radio module and circuit standby / alarm module for minimum consumption. In this context, the thesis aims to develop technology in packaging and interconnexions and vertical transitions

In this manuscript, we propose a new approach to vertical transitions, the TSCV (Through Silicon Coaxial Vias). Vertical transition based on the coaxial model, using benzocyclobutène (BCB) as a dielectric material, the study, development, and evolution of the structure are presented. Because of its nature, this coaxial transition offers all the advantages in packaging with high integration density, with a total electromagnetic isolation from the substrate, and thus completely independent of the nature of the substrate, an ultra low parasitic electromagnetic radiation, and by properties of the BCB, ultra low electromagnetic losses in the millimeter band. We also detail the process e technological achievement and its evolution, allowing the manufacture and testing of these structures.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	3
RESUME	5
ABSTRACT	7
TABLE DES MATIERES	9
INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE I – ETUDE DES TECHNOLOGIES D'INTEGRATION.....	19
1 INTRODUCTION	19
2 LES TECHNOLOGIES D'INTEGRATION	20
2.1 LE SYSTEM IN PACKAGE	20
2.1.1 <i>Définition du SiP</i>	20
2.1.2 <i>SiP vs SoC</i>	21
2.1.2.1 Les points durs	21
3 LES INTERCONNEXIONS 3D	27
3.1 ENVIRONNEMENT DU PROJET SIPCOM	27
3.2 ÉTUDE DES DIFFERENTES TOPOLOGIES DE TRANSITIONS VERTICALES.....	30
3.2.1 <i>Through Silicon Vias</i> :.....	31
3.2.2 <i>Transitions par couplage</i> :.....	38
3.2.3 <i>Transitions en pente</i> :.....	42
3.2.4 <i>Transitions coaxiales</i>	46
3.2.5 <i>Comparaison des technologies de transitions verticales</i>	49
4 CONCLUSION	50
5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51
CHAPITRE II – CONCEPTION ET SIMULATIONS DES TRANSITIONS VERTICALES COAXIALES .	55
1 INTRODUCTION	55
2 METHODOLOGIE DE CONCEPTION	55

2.1	CONTRAINTES LIEES A L'ENVIRONNEMENT	55
2.1.1	<i>Intégration haute densité</i>	55
2.1.2	<i>Structure Large bande</i>	56
2.2	CONTRAINTES LIEES A LA REALISATION TECHNOLOGIQUE	56
3	DEFINITION DES STRUCTURES DE PROPAGATION EN SURFACE	57
3.1	LIGNE MICRO-RUBAN.....	57
3.2	LIGNE COPLANAIRE	58
3.3	LIGNE TRIPLAQUE	59
3.4	LIGNE FENTE.....	59
4	ÉTUDE DE LA STRUCTURE IDEALE – CAS NON REALISABLE	60
4.1	DEFINITION DU CAS IDEAL.....	60
4.2	METHODES D'OPTIMISATION - IMPEDANCE CARACTERISTIQUE	61
4.2.1	<i>Variation du rapport n</i>	64
4.2.2	<i>Variation du diamètre du via</i>	66
5	MODIFICATION DE LA STRUCTURE - CAS REALISABLE	73
5.1	UTILISATION DE VIAS DE MASSE - 4 VIAS.....	73
5.2	UTILISATION DE VIAS DE MASSE – 8 VIAS.....	77
5.3	CONCLUSION PARTIELLE / TRANSITION	80
6	ETUDE SUR SUBSTRAT BASSE RESISTIVITE	82
7	ETUDE DU COUPLAGE EM	84
8	CHANGEMENT DIELECTRIQUE - COAX BCB.....	94
8.1	COMPARAISON DES RESULTATS DES DIFFERENTES STRUCTURES.....	98
8.2	COMPARAISON BCB-8 VIAS SUR LRS	100
8.3	CARTE DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LA STRUCTURE	101
8.4	OPTIMISATION DES STRUCTURES DE PROPAGATION EN SURFACE - PASSAGE AU TRIPLAQUE	102
9	STRUCTURES DE TESTS.....	107
9.1	MODIFICATIONS DE LA STRUCTURE POUR COMPATIBILITE AUX MESURES SOUS POINTES.....	107

9.2	VALIDATION DU MODELE TECHNOLOGIQUE – MESURES DE FILTRES.....	109
10	CONCLUSION.....	112
	CHAPITRE III - PROCEDE DE REALISATION TECHNOLOGIQUE.....	114
1	INTRODUCTION.....	114
2	PROCEDE DE FABRICATION DES TRANSITIONS COAXIALES.....	114
2.1	PROCEDE DE FABRICATION INITIAL.....	114
2.2	ÉTAPE 1 : SUBSTRAT DE DEPART.....	116
2.3	ÉTAPE 2 : GRAVURE DES CAVITES.....	116
2.3.1	<i>Silicium noir.....</i>	<i>119</i>
2.3.2	<i>Piliers sur le fond de gravure.....</i>	<i>119</i>
2.3.3	<i>Difficultés de contrôle de fin de gravure.....</i>	<i>120</i>
2.3.4	<i>Couche d'arrêt transpercée.....</i>	<i>121</i>
2.3.5	<i>Modification du procédé, utilisation d'un masque en SPR220.....</i>	<i>121</i>
2.3.6	<i>Dissolution du C₄F₈.....</i>	<i>122</i>
2.4	ÉTAPE 3 : METALLISATION DES PLANS DE MASSE.....	123
2.4.1	<i>Lissage du scalloping.....</i>	<i>124</i>
2.5	ÉTAPES 4 ET 5 : REPORT DU FILM DE BCB EN FACE ARRIERE ET DEPOT DU BCB DANS LES CAVITES.....	127
2.6	ÉTAPE 6 : GRAVURE DU BCB.....	131
3	PROCEDE DE REALISATION TECHNOLOGIQUE MODIFIE.....	134
3.1	ÉTAPE 1 : SUBSTRAT DE DEPART.....	135
3.2	ÉTAPE 2 : GRAVURE DES CAVITES.....	135
3.3	ÉTAPE 3 : METALLISATION DES PLANS DE MASSE.....	136
3.4	ÉTAPE 4 : DEPOT DE BCB.....	137
3.5	ÉTAPE 5 : GRAVURE DU BCB EN FACE AVANT.....	139
3.6	ÉTAPE 6 : AMINCISSEMENT DU SUBSTRAT DE SILICIUM.....	140
3.7	ÉTAPE 7 : METALLISATION DES PLANS DE MASSE FACE ARRIERE ET GRAVURE.....	140
3.8	ÉTAPE 8 : DEPOT DU BCB EN FACE ARRIERE.....	141

3.9	ÉTAPE 9 : GRAVURE DU BCB FACE ARRIERE AU NIVEAU DE L'AME CENTRALE.....	141
3.10	ÉTAPE 10 : METALLISATION DES LIGNES DE PROPAGATION.....	142
3.11	STRUCTURE COMPLETE	142
4	FABRICATION ET CARACTERISATION DES MOTIFS DE TEST:.....	143
5	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	147
	CONCLUSION GENERALE.....	149
	CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES:.....	153
	TABLE DES FIGURES	155
1	CHAPITRE I :.....	155
	Liste des tableaux.....	164
	ANNEXES.....	166
1	CONCEPTION DE LA TRANSITION VERTICALE COAXIALE	166
1.1	ÉTUDES DES RAPPORTS D'ASPECTS OPTIMAUX SELON CHAQUE DIAMETRE DE VIA ETUDIE – STRUCTURE SILICIUM.....	166
1.1.1	<i>CAS n°1 : Diamètre de via de 37,5 µm, n variant de 4 à 8.</i>	<i>166</i>
1.1.2	<i>CAS n°2 : Diamètre de via de 50 µm, n variant de 4 à 8.</i>	<i>167</i>
1.1.3	<i>CAS n°3 : Diamètre de via de 75 µm, n variant de 3 à 7.</i>	<i>168</i>
1.1.4	<i>Comparaison des différents cas dans leur configuration optimale :</i>	<i>169</i>
1.2	ÉTUDE DE LA MODELISATION DU PLAN DE MASSE PAR 4 VIAS, SELON CHAQUE DIAMETRE DE VIA ETUDIE – STRUCTURE SILICIUM.....	171
1.2.1	<i>CAS n°1 : Diamètre de via de 37,5 µm.</i>	<i>171</i>
1.2.2	<i>CAS n°2 : Diamètre de via de 50 µm.</i>	<i>172</i>
1.2.3	<i>CAS n°3 : Diamètre de via de 75 µm.</i>	<i>173</i>
1.3	ÉTUDE DE LA MODELISATION DU PLAN DE MASSE PAR 8 VIAS, SELON CHAQUE DIAMETRE DE VIA ETUDIE – STRUCTURE SILICIUM.....	175
1.3.1	<i>CAS n°1 : Diamètre de via de 37,5 µm.</i>	<i>175</i>
1.3.2	<i>CAS n°2 : Diamètre de via de 50 µm.</i>	<i>176</i>
1.3.3	<i>CAS n°3 : Diamètre de via de 75 µm.</i>	<i>178</i>

INTRODUCTION GENERALE

On a souvent répété ces dernières années que la loi de Moore allait atteindre ses limites. Cette prédiction a prouvé qu'elle était prématurée. Nous approchons actuellement des limites physiques de miniaturisation des technologies CMOS et la poursuite de la croissance industrielle ne pourra pas continuer en se basant simplement sur ce principe de miniaturisation. Elle nécessite une pensée "More than Moore" à travers l'intégration de technologies hétérogènes au niveau système dans l'approche tout en un. Dans le passé, la miniaturisation permettait l'amélioration des performances, la réduction de la consommation de puissance et des coûts plus faibles. Aujourd'hui, la miniaturisation seule n'assure plus la réussite de ces trois enjeux.

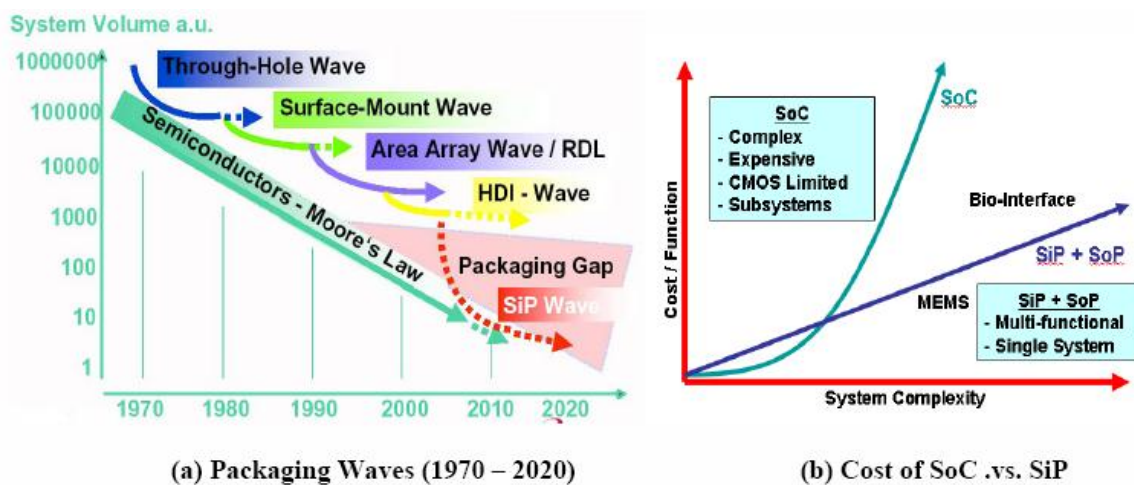


Figure 1: Packaging Waves and Costs of SiP .vs. SoC (Source IZM Fraunhofer)

Les technologies d'intégration System on Chip (SoC) et System in Package (SiP) fournissent une voie d'amélioration en termes de performances, puissance, prix et dimensions, complémentaire aux innovations de dimensions des circuits CMOS.

La technologie System in Package (SiP) a rapidement évolué à partir de technologies spécifiques utilisées dans un nombre limité de domaines, pour s'ouvrir à des technologies de gros volumes de production, avec un impact important sur le marché de l'électronique. Un exemple de large utilisation de la technologie SiP a été l'évolution des circuits logiques et mémoires empilés (intégrant circuits passifs et composants multi signaux) pour les applications de téléphonie mobile. Ces applications proviennent de productions à grands volumes et un marché à compétitivité de coûts a été développé. De nombreux concepts de mise en boîtier SiP trois dimensions (3D) émergent actuellement en réponse à la forte demande des consommateurs de produits portables.

La technologie SiP a émergé en tant qu'approche complémentaire de la technologie d'intégration System on Chip (SoC), car elle présente des avantages sur le SoC dans plusieurs domaines. Plus précisément le SiP procure une flexibilité d'intégration, des coûts R&D et de production plus faibles. Le SiP n'est pas une solution de rechange pour l'intégration silicium

de puces seules, mais il est perçu comme complémentaire au SoC. Par exemple, certaines applications d'intégration SiP contiendront des composants SoC. La figure 1 illustre la place des technologies d'intégration parallèlement à la loi de Moore, et les spécificités propres aux technologies d'intégration SoC et SiP.

La demande du marché de l'électronique pour des performances plus élevées, des dimensions réduites, une consommation et un prix plus faibles, ne peut être satisfaite en continuant de développer les technologies d'intégration et d'interconnexion conventionnelles. Il existe des limites non franchissables, en termes de densité d'interconnexions, de gestion thermique, de largeur de bande ou d'intégrité des signaux. La technologie d'intégration System in Package est certainement la voie la mieux adaptée pour dépasser ces limites.

Les performances globales, les dimensions, le coût, et la fonctionnalité d'un module SiP seront limités, d'une part par la technologie d'interconnexion propre à une puce individuelle, et d'autre part par la technologie d'interconnexion de cette puce au reste du système. Aujourd'hui, les performances des microprocesseurs, leurs prix, leurs complexités de fabrication, leurs dissipations de puissance et leurs tailles sont limitées par les technologies d'interconnexion intrinsèques à la puce. Au niveau des interconnexions systèmes, la faible largeur de bande des entrées/sorties et l'incapacité de délivrer des puissances d'alimentation élevées ont limité les performances aux "limites intrinsèques" de chaque génération de technologie.

Bien sûr d'autres phénomènes imposent des limites au système. C'est le cas de la dissipation thermique qui peut limiter la densité d'intégration du système et les performances du module SiP. De plus d'autres facteurs influent sur ces technologies d'ultra faible consommation comme la densité d'intégration, les contraintes mécaniques intrinsèques aux matériaux et aux procédés de réalisation ou les rayonnements électromagnétiques parasites.

Ces travaux visent à proposer une approche originale pour le développement de nouveaux systèmes d'interconnexion et de packaging, dans le but de répondre aux contraintes induites par la technologie d'intégration System in Package. La conception et l'évolution de ces systèmes ont été menées avec le souci de proposer des techniques génériques utilisables dans d'autres modules 3D.

Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre présente les technologies d'intégration, et notamment la technologie d'intégration en trois dimensions System in Package. Après en avoir rappelé les avantages et intérêts, en comparaison avec les technologies d'intégration classiques, nous y identifions les points clés et les défis, pour nous concentrer enfin sur le cœur de ces travaux, le développement de technologies d'interconnexion trois dimensions.

Le deuxième chapitre traite de la conception et du développement des nouvelles structures de transitions verticales que nous proposons. Au cours de la première partie, nous expliquons de quelle façon la réflexion sur l'optimisation de structures actuelles nous a amené à concevoir

un nouveau type original de transitions verticales coaxiales (ou TSCV: Through Silicon Coaxial Vias). La seconde partie présente leur optimisation dans le but d'une universalité d'applications et de technologies.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous expliquons la démarche menée pour le développement d'un procédé de réalisation technologique basse température de ce type de connexion verticale. Au cours de ce chapitre, nous étudierons chaque étape du procédé de fabrication, ainsi que son optimisation, étape par étape, et enfin la modification du procédé global qui a permis de lever les verrous technologiques.

CHAPITRE I – ETUDE DES TECHNOLOGIES D'INTEGRATION

1 Introduction

L'évolution des technologies sans fil amène depuis plusieurs années à de nouvelles applications émergentes dans le monde de l'industrie électronique : l'intelligence ambiante, les objets mobiles communicants, les réseaux de capteurs. Ces nouveaux sujets de recherche voient le jour dans de nombreux laboratoires, à l'échelle mondiale. La naissance des modules électroniques autonomes communicants a amené les groupes de recherche à concevoir de nouvelles technologies sur les points clés du développement. Ces développements se retrouvent limités lorsqu'ils tiennent à suivre la voie utilisée généralement jusqu'alors, c'est à dire la miniaturisation à l'échelle du composant, prédite par la loi de Moore. En effet, la loi de Moore arrive actuellement à ses limites physiques. La miniaturisation, qui, hier, s'accompagnait de meilleures performances, d'une consommation réduite et d'un coût atténué, n'est aujourd'hui plus envisageable comme seule voie de développement. La pensée "More than Moore" doit s'inscrire à ce niveau de la recherche et porter les critères d'évolution technologique sur les parties complémentaires au composant.

De plus, les systèmes électroniques futurs se caractérisent par une hétérogénéité augmentée, et cela selon plusieurs critères : du point de vue technologique avec des composants numériques, analogiques, RF, optoélectroniques, MEMS, passifs et autres, du point de vue des fréquences de fonctionnement allant de quelques MHz en numérique à plusieurs dizaines de GHz pour les composants RF et les numériseurs large bande, et du point de vue puissance, avec des systèmes très basses puissances couplés à d'autres composants à puissances élevées. De plus la gestion de la consommation et de la dissipation thermique implique un développement des technologies d'intégration permettant une optimisation de ces imbrications. Dans ce but, les technologies d'intégration ont été repensées et complétées pour assurer de meilleures performances, à l'échelle du système global.

Le but de ce chapitre est de présenter les technologies d'intégration en développement. Nous détaillerons notamment le System in Package (SiP) pour présenter ses points clés et ses challenges, et introduirons le but de ces travaux, c'est-à-dire les technologies de transitions verticales, partie importante dans le succès des nouvelles technologies d'intégration.

2 Les technologies d'intégration

L'amélioration des technologies d'intégration amène au développement de nouveaux systèmes, plus petits, plus rapides, plus légers et ayant des consommations ultra faibles. La nouvelle tendance dans le domaine de l'intégration porte sur la mise en boîtier collective de différents circuits, issus de différentes filières technologiques. Les technologies d'intégration conventionnelles présentent des caractéristiques qui peuvent limiter les performances des systèmes. Ceci nécessite de faire évoluer ces technologies qui deviennent limitatives et coûteuses. Au vingt et unième siècle, la microélectronique est capable d'implémenter plus d'un milliard de transistors dans une puce unique. Cela signifie que n'importe quel circuit n'occupe qu'un volume efficace minimal. Le challenge maintenant n'est plus d'implémenter des dizaines de milliards de transistors, mais de réussir à intégrer ensemble des circuits de filières technologiques différentes de façon hétérogène, efficace et peu coûteuse [1, 2].

Dans ce but de nombreux travaux ont été menés afin de concevoir une technologie d'intégration capable de rassembler efficacement les circuits et composants nécessaires à un système global. La technologie System in Package (SiP) est dans ce sens l'une des technologies les plus abouties à l'heure actuelle. Nous présentons ici cette technologie, en comparaison aux technologies d'intégration qui la précédaient.

2.1 Le System in Package

2.1.1 Définition du SiP

La technologie d'intégration System in Package (SiP) est un concept récent d'intégration de systèmes en trois dimensions [3, 4]. Contrairement à la technologie System on Chip (SoC), qui utilise le concept d'intégration deux dimensions, le SiP permet d'intégrer des technologies différentes utilisant différents procédés de fabrication, des composants passifs intégrés (Integrated Passive devices – IPD) et des circuits intégrés dans un unique module sans compromettre les performances de chaque partie. Composants passifs, microsystèmes, circuits actifs, antennes et autres sous systèmes peuvent être intégrés dans le même boîtier pour former un système unique fonctionnel. Pour atteindre ce niveau d'intégration, l'approche SiP permet de dépasser les limites actuelles connues sans compromettre la technologie de chaque partie. Ce concept utilise des circuits intégrés conçus et fabriqués dans leurs propres filières technologiques. Circuits analogiques et numériques doivent pouvoir fonctionner comme s'ils étaient implantés individuellement. Les circuits hautes fréquences peuvent être intégrés avec des composants passifs haute qualité dans un environnement adapté, permettant des performances électromagnétiques optimisées.

Définition du SiP :

La technologie d'intégration System in Package (SiP) est une combinaison de multiples composants électroniques actifs, de différentes fonctions et filières technologiques, assemblés en un module unique proposant différentes fonctions associées à un système ou sous-système. Un module SiP peut également contenir des éléments passifs, MEMS, composants optiques et autres systèmes sur puces.

2.1.2 SiP vs SoC

2.1.2.1 Les points durs

L'utilisation des technologies d'intégration trois dimensions au lieu des technologies deux dimensions présente plusieurs avantages : une diminution significative en termes de poids et de volume, une meilleure connectivité entre les composants dans un module trois dimensions, une réduction du bruit et une consommation améliorée grâce aux parasites plus faibles, des délais plus courts et des fréquences d'opération plus élevées [5]. De plus, l'approche SiP offre une alternative au SoC qui est incompatible avec l'intégration hétérogène, en termes de réalisation technologique et de coût. Mais le SiP présente tout de même certains inconvénients comme une complexité d'assemblage, une limite de compatibilité des différentes technologies ou des pertes dans les interconnexions verticales. De plus, par sa nature d'intégration globalisée, le SiP induit des problématiques de tests et de contrôles des systèmes, l'accès aux composants étant impossible à la fin du montage, et de ce fait la fiabilité du procédé de réalisation doit être adaptée. Enfin, la haute densité d'intégration, impliquée par la mise en boîtier en trois dimensions, amène à des problèmes d'intégrité du signal, parfois sujet aux rayonnements électromagnétiques parasites émis par les systèmes voisins.

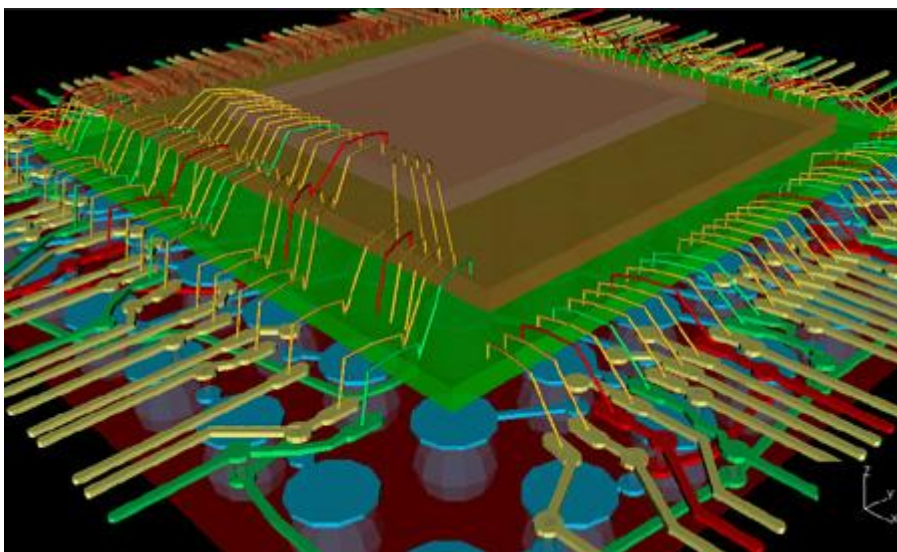


Figure 2-1 : Schéma 3D d'un concept de SiP

A titre d'exemple, la Figure 2-1 illustre un concept de technologie d'intégration SiP, où les composants et sous-systèmes nécessaires sont mis en boîtier collectivement afin de créer une fonction globale fonctionnelle [6]. Dans ce type de systèmes on trouvera des puces intégrées, des interconnexions hautes et basses fréquences, des éléments passifs, ainsi que des systèmes d'intelligence embarquée, des capteurs ou encore des batteries. Au niveau fabrication, la réalisation des interconnexions verticales est un point critique du procédé de la plateforme SiP.

Les points clés du développement de la technologie SiP sont :

- Miniaturisation physique du système
- Haute densité d'intégration de composants ou circuits de différentes filières technologiques
- Intégration de module radio, de traitement de signal, d'intelligence embarquée système, de systèmes de récupération d'énergie ambiante, de micro-batteries, de capteurs....
- Temps de propagation des signaux minimisés
- Fréquence d'opération élevée
- Dissipation thermique maîtrisée
- Fiabilité
- Testabilité des différentes fonctions
- Coûts de fabrication faible
- Intégrité du signal

L'une des étapes clés du procédé SiP se situe au niveau de l'intégration des fonctions au sein d'un module 3D unique. La maîtrise des procédés d'assemblage pour l'intégration de ces systèmes est essentielle pour le bon fonctionnement global du module [7]. Les points clés sont : amincissement de substrats, découpe, report des puces, interconnexions, et mise en boîtier. Ces procédés deviennent de plus en plus complexes si l'on veut satisfaire les critères du système évoqués ci-dessus.

Nous détaillons ici ces différentes parties :

L'amincissement de substrat est devenu une étape standard des procédés de fabrication actuels. Aujourd'hui, les composants utilisent des substrats d'épaisseur inférieure à 15 micromètres. Ce phénomène va s'accroître avec l'arrivée de la technologie 3D SiP où le volume global de l'empilement complet dépendra majoritairement de l'épaisseur des substrats utilisés. La Figure 2-2 présente les différentes technologies de découpe et d'amincissement [8]. La méthode conventionnelle utilise l'amincissement face arrière du substrat (Back Side

Grinding, BSG), le montage du substrat sur support (Wafer Mount) puis la découpe mécanique (Dicing). Les méthodes DBG (Dicing Before Grinding) et DBG + CMP (Chemical Mechanical Polishing) préfèrent effectuer une découpe mécanique en première étape, puis l'amincissement, une étape de polissage en option, pour enfin monter le substrat sur son support. La dernière technique consiste à remplacer la découpe mécanique (Dicing) par une découpe par usineur plasma (Reactive Ion Etching, RIE), qui permet de limiter les poussières et les contraintes mécaniques causées par cette étape. Il apparaît néanmoins que la séparation et la manipulation de ces puces ultra fines va demander des innovations en matériel de production et en nouveaux matériaux.

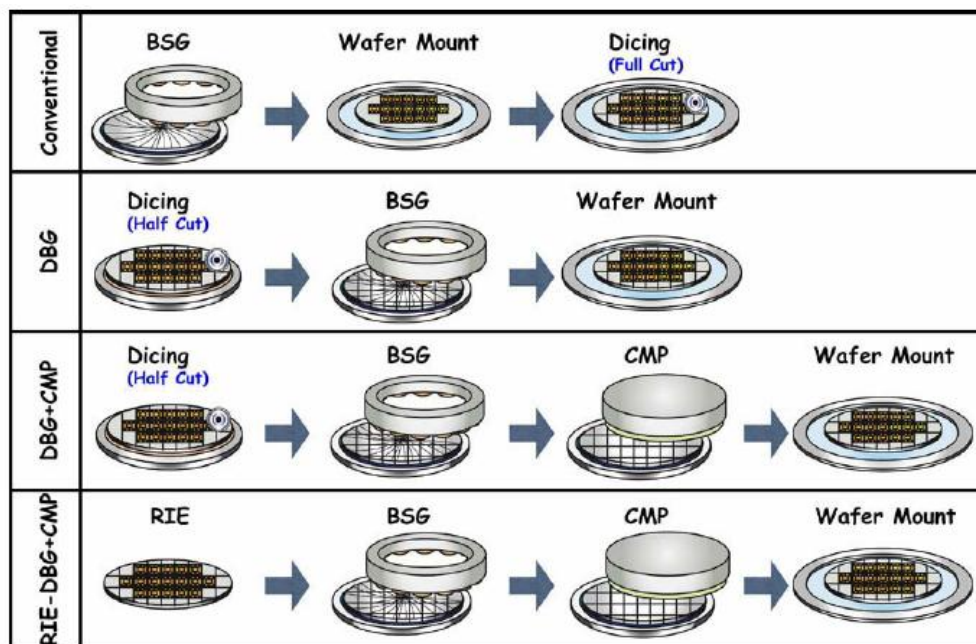


Figure 2-2 : technologies de découpe et amincissement de substrats

Ensuite, les matériaux utilisés pour le report et le collage des puces vont devoir proposer dans le futur de nouvelles caractéristiques, telles qu'une bonne conductivité thermique pour la dissipation de chaleur, la photosensibilité pour la création de motifs, et une bonne compatibilité avec les contraintes d'expansion thermique (CTE) des matériaux provenant des différentes filières technologiques.

D'autre part de nombreuses approches ont été développées pour fixer la puce au substrat d'accueil et créer la connexion électrique entre la puce et les lignes de propagation sur le substrat. Les plus utilisées sont le câblage par fil ou ruban et le report flip chip. Le câblage par fil est une connexion filaire de la puce au substrat à l'aide de micro-fils soudés sur chaque partie. Cette technique ancienne est bien maîtrisée et des équipements de câblage automatiques existent. Cependant, l'évolution de la technologie montre que la tendance vise à raccourcir au maximum la longueur des fils utilisés, afin de limiter au maximum les pertes électromagnétiques, surtout en gamme millimétrique. La Figure 2-3 présente des interconnexions simples du substrat à une puce, alors que la Figure 2-4 montre un

empilement de puces souvent utilisé avec cette technologie. Cette technique utilise l'empilement des puces afin de créer des interconnexions en escalier et raccourcir les longueurs de fils. La Figure 2-4 (b) présente quant à elle un zoom sur le pitch, c'est à dire sur la surface de soudure utilisée pour la connexion des fils. Enfin la Tableau 2-1 illustre l'évolution de cette technologie [9].

Le câblage par fil a été un élément de développement clé de l'industrie du semi-conducteur. Quatre vingt dix pour cent des connexions de puces utilisent le câblage par fil. Malgré de nombreuses études prédisant que le câblage par fil atteint actuellement ses limites physiques, cette technologie ne cesse d'innover pour rester compatible avec les développements technologiques modernes.

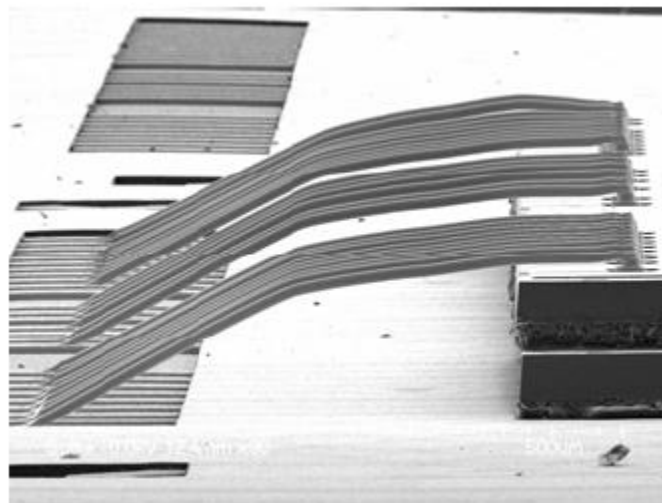


Figure 2-3 : Câblage par fil pour connectique de puces

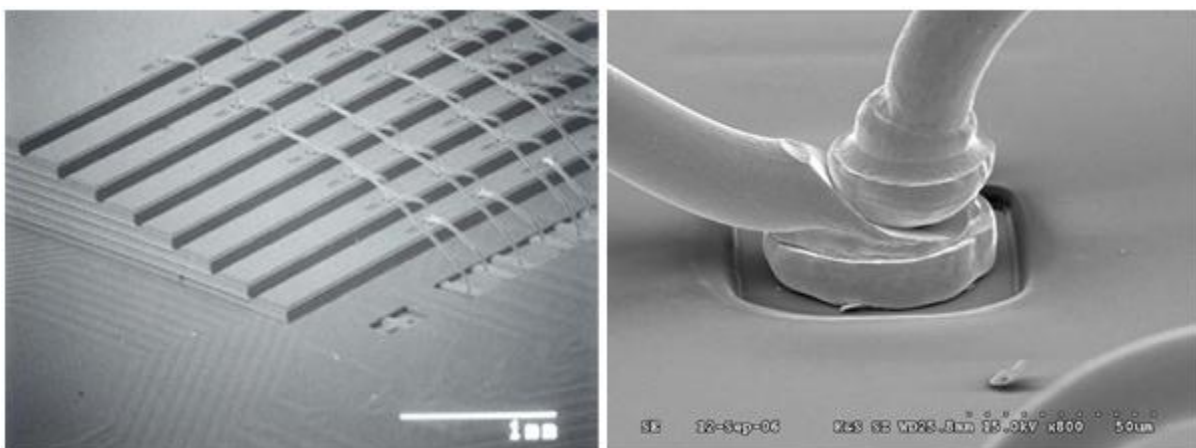


Figure 2-4 : Câblage par fil connectique de puces en cascade, (à gauche), Zoom sur une microsoudure (à droite)

Vert : validé / Bleu : projeté

Épaisseur maximum du package			
1,0 mm	0,9 mm	0,8 mm	0,7 mm
Hauteur maximum de la boucle			
75 µm	50 µm	40 µm	
Épaisseur supplémentaire/distance (pour production de masse)			
100 µm/1,0 mm	100 µm/1,5 mm	100 µm/2,0 mm	
75 µm/0,5 mm	75 µm/0,75 mm	75 µm/1,75 mm	75 µm/2,0 mm
50 µm/0,25 mm	50 µm/0,4 mm	50 µm/0,75 mm	50 µm/1,0 mm
Épaisseur de la première puce (de l'empilement)			
75 µm	50 µm	40 µm	
Pitch/Diamètre du fil			
60 µm/25 µm	50 µm/20 µm	45 µm/15 µm	40 µm/15 µm
Nombre de puces actives par empilement			
6	8	8	9
Nombre de puces actives par boîtier (grand volume)			
3	4	5	6
Équipement et Matériel spécifique			
Soudures programmable/connexions en cascade		Connexions 3D	Fils spéciaux

Tableau 2-1 : Évolution des technologies de Câblage par fil

Ensuite, le procédé d'interconnexion flip chip (Figure 2-5) a d'abord été développé pour les applications multi systèmes dans les modules céramiques. Il est devenu le procédé standard d'interconnexion pour substrats organiques pour les applications de microprocesseurs et cartes graphiques. Les éléments clés du report flip chip sont : la formation des "bumps" (billes métalliques servant de connexion (cf. Figure 2-6), le maintien de la puce par remplissage des espaces libre à la jonction ("underfill"), et les propriétés du matériau utilisé pour la dissipation thermique.

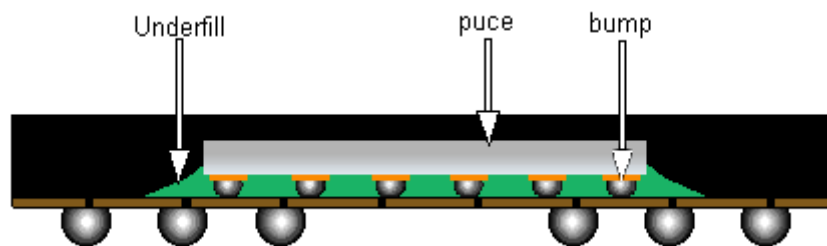


Figure 2-5 : Schéma de la technologie Flip Chip

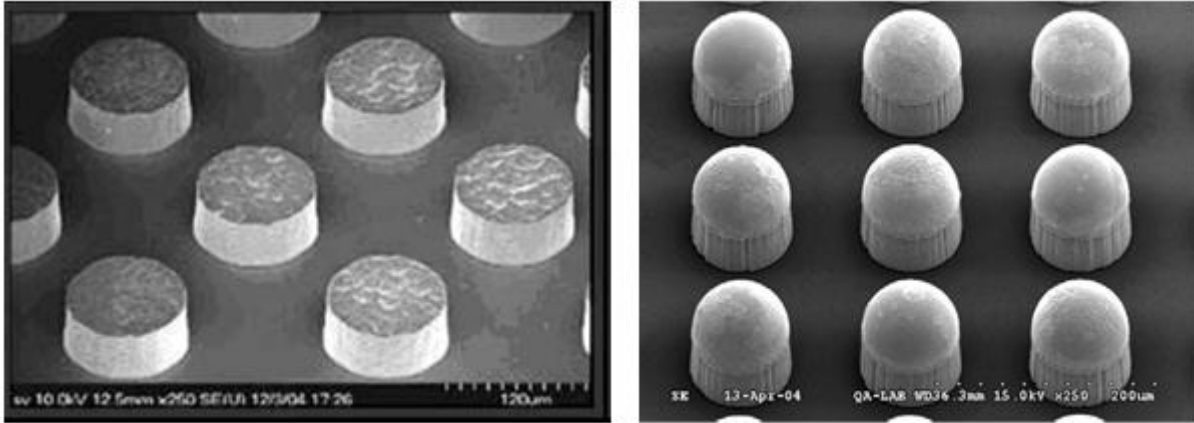


Figure 2-6 : Réalisation de bumps pour les interconnexions Flip Chip

Enfin le dernier point clé des technologies d'intégration 3D se situe au niveau de la mise en boîtier. En effet les technologies de mise en boîtier, ou de packaging, permettent d'englober le système, de le protéger de son environnement, physiquement, électromagnétiquement, et thermiquement. A l'inverse le packaging doit s'adapter au système pour ne pas le détériorer, ne pas influencer sur les performances électromagnétiques, permettre la dissipation thermique et ne pas contraindre physiquement le système. La montée en fréquences des technologies rend ces systèmes de plus en plus sensibles aux boîtiers d'encapsulation, ce qui implique le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de mise en boîtier. De même la tendance vers des systèmes ultra-faible consommation induit des puissances de travail très faibles, et donc une sensibilité accrue aux rayonnements parasites.

Nous avons décrit les étapes clés du développement de la technologie d'intégration 3D SiP. Amincissement du substrat, découpe, report des puces, interconnexions, et mise en boîtier sont les étapes nécessaires et indispensables à la validation de cette approche. Ces procédés sont en développement dans de nombreux laboratoires et les avancements sur ces travaux sont prometteurs. L'une des faiblesses du système reste la propagation des signaux hautes fréquences à travers les niveaux du module. En effet, les technologies d'interconnexion 3D de type TSV (Through Silicon Vias) présentent des performances relativement inadéquates pour les systèmes travaillant dans les bandes de fréquences supérieures à 30 GHz. Nous présentons ces technologies dans les paragraphes suivants.

3 Les interconnexions 3D

Les technologies d'interconnexions 3D ont beaucoup évolué depuis quelques années. Les systèmes émergents d'intégration 3D cherchant toujours de meilleures performances, moins de consommation et des dimensions réduites, les structures de propagation ont dû suivre cette évolution afin d'éviter de créer des limitations électromagnétiques ou physiques.

Pour les structures de propagation verticales, à travers les substrats, la tendance est la même. De nombreuses topologies ont été développées et d'autres sont encore en développement. Elles sont présentées ici avec leurs avantages et leurs inconvénients. Les facteurs de mérite portent sur les dimensions, l'isolation de la structure du point de vue électromagnétique, la facilité ou difficulté de réalisation, les performances mécaniques et électromagnétiques. Pour ces deux derniers points, le choix d'un type de structure dépend fortement de son environnement : quels matériaux sont utilisés, quelle est la gamme de fréquences des signaux à propager... Il est donc nécessaire de déterminer préalablement le cahier des charges du boîtier que nous voulons concevoir pour définir la solution d'interconnexion la mieux adaptée.

Les principales topologies d'interconnexions verticales sont : les TSV (Through Silicon Vias) dans différentes configurations, les interconnexions par couplage (sans connexion métallique), les transitions en pente, les vias et multivias. Ces topologies vont être présentées dans un cas général ainsi que dans l'environnement particulier de notre projet. Elles seront ensuite comparées à notre approche coaxiale. Notre étude cherche à proposer une solution adaptée non seulement à notre projet mais pouvant constituer une technologie générique.

Le choix d'une technologie d'interconnexion repose sur les points suivants : Bande de fréquences utilisable, rayonnement électromagnétique parasite, matériaux utilisés comme substrat, difficulté de réalisation du procédé technologique et compatibilité du procédé avec le reste du système.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet ANR nommé "SIPCOM" [10], qui concerne l'intégration hétérogène d'un microsystème intelligent communicant à 60 GHz. Ce projet est piloté par l'IEMN avec les partenaires suivant: CEA-LETI, DelFMEMS, IETR, Thales Alenia Space, OMMIC, ST-M, XLIM.

3.1 Environnement du projet SIPCOM

Site web du projet : <http://sipcom.iemn.univ-lille1.fr/>

L'objectif du projet est la réalisation d'un module radio ultra-compact en gamme millimétrique. L'approche « intégration hétérogène » a été adoptée afin d'assurer des performances électromagnétiques très élevées. Ce module doit intégrer toutes les fonctions

nécessaires pour réaliser un émetteur 60 GHz : un réseau d'antennes, des déphaseurs à base de MEMS pour assurer l'agilité du faisceau, un convertisseur DC/DC pour alimenter les MEMS, un FPGA (provenant du commerce) pour commander la reconfigurabilité du module radio et les circuits mise en veille/réveil du module pour une consommation minimale.

Les points durs qui seront levés au cours du projet SIPCOM sont les suivants :

- Intégration du réseau d'antennes à agilité de faisceau à base de MEMS RF au module 3D. Les antennes s'avèrent déterminantes pour l'encombrement du module et pour les performances du bilan de liaison pour des systèmes de communication. Pour obtenir une couverture radio globale dans un environnement domestique à 60 GHz, les premières études ont montré qu'une agilité de faisceau était nécessaire [25]. C'est pourquoi, dans le projet SIPCOM, nous étudierons l'intégration hétérogène de la reconfigurabilité de l'antenne à base de MEMS RF. L'utilisation de MEMS RF permet d'obtenir une agilité de faisceau avec une consommation associée quasiment nulle. La faible consommation est une notion très importante pour tous les systèmes de communication entre objets autonomes fixes ou mobiles. La conception des antennes au sein du projet SIPCOM est réalisée par le CEA-LETI et IETR.
- Réalisation d'un démonstrateur d'un émetteur radio complet 60 GHz en intégration hétérogène. Pour cela, le projet utilisera un émetteur fourni par l'IEMN (utilisant la technique ULB impulsienne transposée à 60 GHz), un circuit de pompe de charge fourni par Thales Alenia Space France, utilisé pour l'alimentation des MEMS intégrés pour les fonctions de déphasage (réalisés par XLIM) et de mise en veille/réveil du système (réalisée par DelfMEMS), et un circuit FPGA commercial pour commander l'ensemble. Ce démonstrateur permettra de valider la faisabilité d'une intégration hétérogène 3D d'un système de communication associant des MEMS RF pour obtenir un système ultra-compact, de faible coût, tout en garantissant des performances techniques de haut niveau.

Compte tenu des technologies utilisées, il a été décidé que le développement du boîtier se ferait sur des substrats silicium. Pour réduire l'encombrement du module et raccourcir la longueur des transitions verticales, l'épaisseur du substrat utilisé sera de 150 μm . Ces substrats sont disponibles dans le commerce. L'IEMN est en charge de la conception et la fabrication de cette plateforme Silicium intégrant les connexions verticales.

Le projet SIPCOM est l'un des tout premiers projets à développer un SIP millimétrique. Nous présentons Figure 3-1 une vue schématique du démonstrateur proposé dans ce projet.

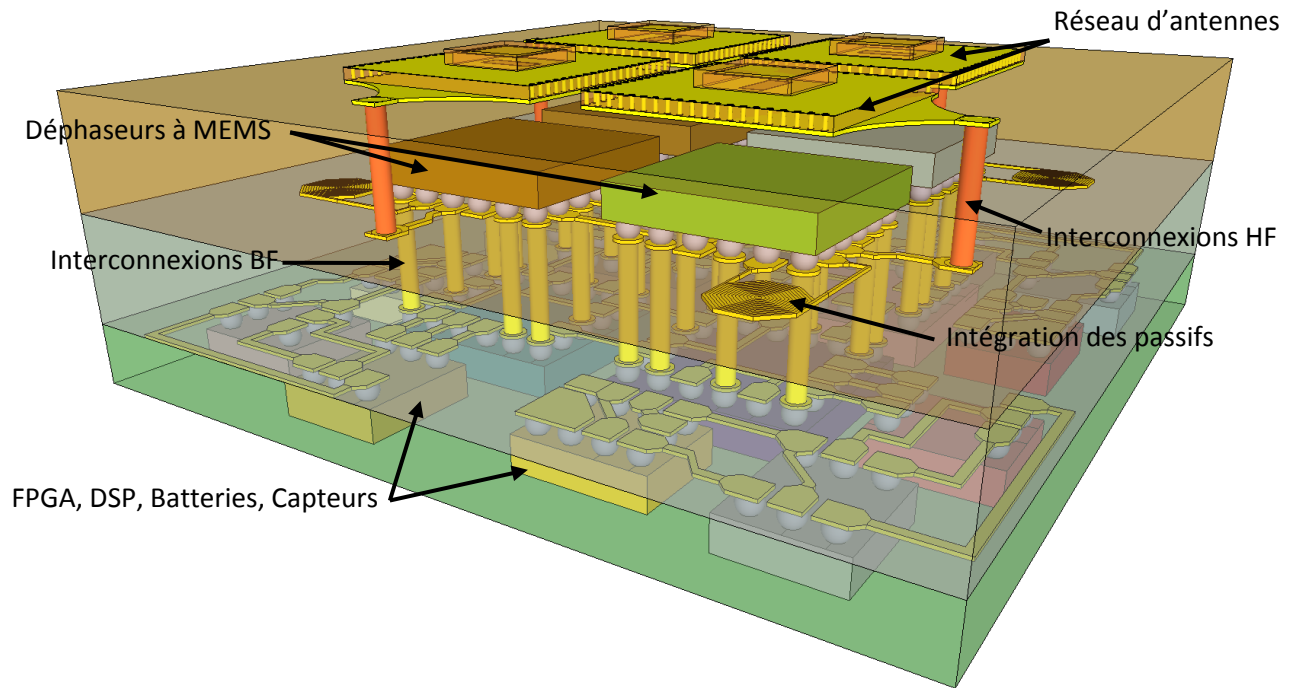


Figure 3-1 : Concept du démonstrateur développé pour le projet SIPCOM

Le cahier des charges du projet SIPCOM a servi de base à la définition des paramètres de conception des transitions verticales :

- L'environnement hyper-dense au point de vue électromagnétique demande une forte isolation de la transition.
- L'utilisation d'une technologie silicium pour les substrats supports, de résistivité de l'ordre de $10000 \Omega \cdot \text{cm}$, et d'une épaisseur de $150 \mu\text{m}$ qui seront micro-usinés.
- Des pertes d'insertion et une adaptation optimisées en gamme de fréquences millimétriques (autour de 60 GHz) pour maximiser le bilan de puissances et ainsi assurer une ultra-faible consommation.

Dans ce but nous avons réalisé une étude détaillée de tous les systèmes de transitions verticales existantes ou en cours de développement, afin de définir notre propre concept. Les paragraphes suivants présentent les résultats les plus prometteurs.

3.2 Étude des différentes topologies de transitions verticales

L'étude des topologies de transitions verticales s'est déroulée en plusieurs étapes. D'abord une étude bibliographique, en étudiant la structure et les résultats de simulations et/ou de mesures présentés dans des articles internationaux. Bien-sûr, les résultats présentés ne correspondent que rarement à notre contexte. Les structures présentées ici sont celles qui nous ont paru les plus intéressantes, et donc candidates comme solution de transitions verticales. Une étude complète et une description détaillée sont présentées :

- D'abord, les TSV (Through Silicon Vias) sont des structures de vias métalliques traversant le substrat verticalement.
- Ensuite les transitions verticales par couplage utilisent par exemple le couplage électromagnétique en champ proche de deux patches situés de part et d'autre du substrat pour faire transiter l'information.
- Puis les transitions dites "en pente" utilisent la gravure chimique anisotrope du silicium selon des plans de cristallisation inclinés pour faire descendre de façon douce des lignes de propagation classiques, jusqu'à atteindre l'autre face du substrat.
- Enfin les transitions verticales coaxiales, qui, sur le modèle des TSV, sont des transitions métalliques qui traversent le substrat mais cette fois sur le modèle de lignes coaxiales, permettant d'améliorer les performances électromagnétiques de la transition.

3.2.1 Through Silicon Vias :

La topologie la plus répandue de transition verticale est le TSV (Through Silicon Via). Cette transition est composée très simplement d'un ou plusieurs vias métalliques traversant le substrat. Cette topologie est utilisée dans différentes configurations, mais les résultats restent similaires, ainsi que le procédé de réalisation technologique.

Y.S. Cho et R.R. Franklin proposent un design de TSV pour lier des lignes coplanaires à travers un substrat de silicium [11]. Leur topologie est présentée Figure 3-2.

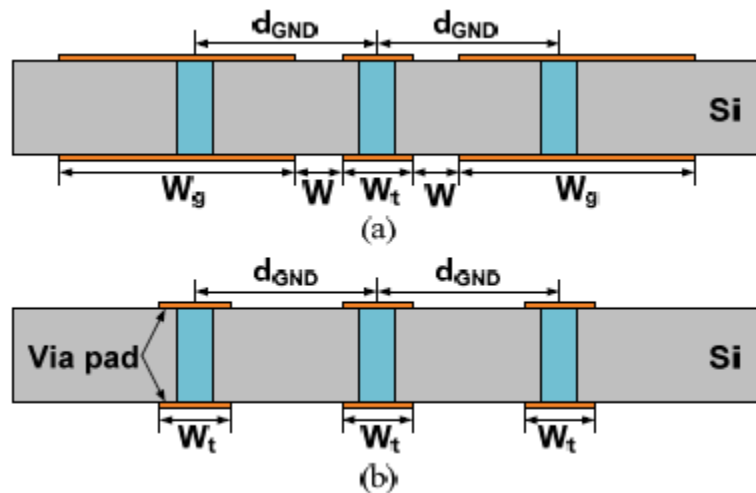


Figure 3-2 : Vue en coupe des transitions TSV pour lignes coplanaires (a) conventionnelles, (b) optimisées en surface

Cette structure utilise la découpe des lignes en surface afin de minimiser la désadaptation d'impédance provoquée par la rupture de géométrie. La Figure 3-3 présente une vue de dessus ainsi que les dimensions de la structure. Tous les résultats de cette étude sont comparés à ceux d'une structure TSV conventionnelle, c'est-à-dire sans cette découpe en surface.

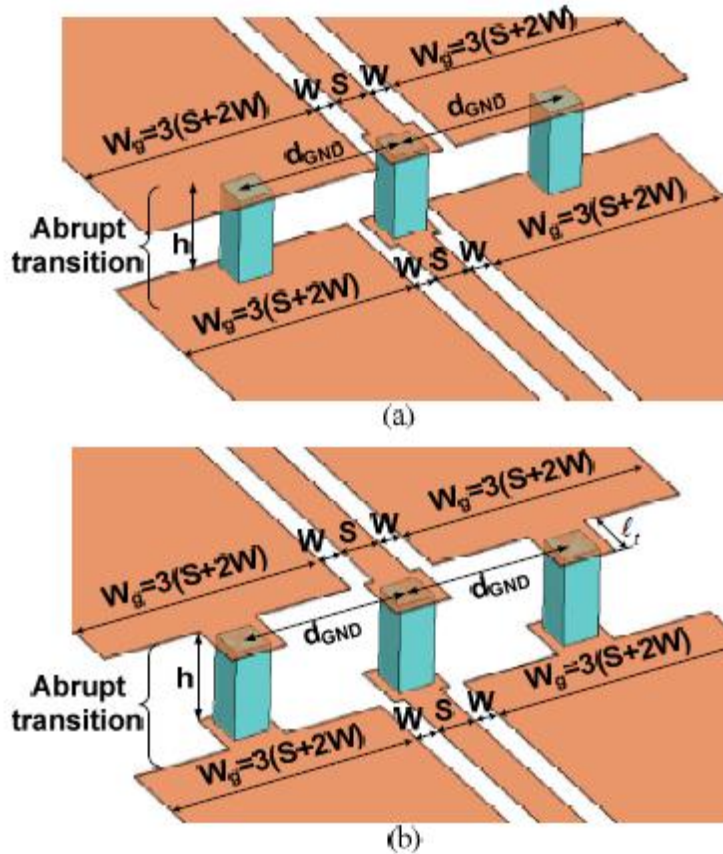


Figure 3-3 : Vue de dessus des transitions TSV pour lignes coplanaires (a) conventionnelles, (b) optimisées en surface

Pour ce développement, les auteurs utilisent un substrat de silicium de 200 μm d'épaisseur. Les résultats de mesures électromagnétiques sont présentés Figure 3-4. Les auteurs ont optimisé leur structure en déplaçant le plot de masse en surface. La position optimum de ce plot est située au milieu de la largeur du plan de masse ($d_{\text{gnd}}=154,5 \mu\text{m}$). Dans cette situation, les résultats de mesures présentent un coefficient de réflexion sous la barre des 20 dB sur 96% de la bande DC-50 GHz, et des pertes par insertion dues à la transition (comparées avec une ligne coplanaire de même longueur) de 0,2 dB/mm sur cette même bande de fréquences. En outre, le procédé de réalisation est relativement simple à mettre en œuvre.

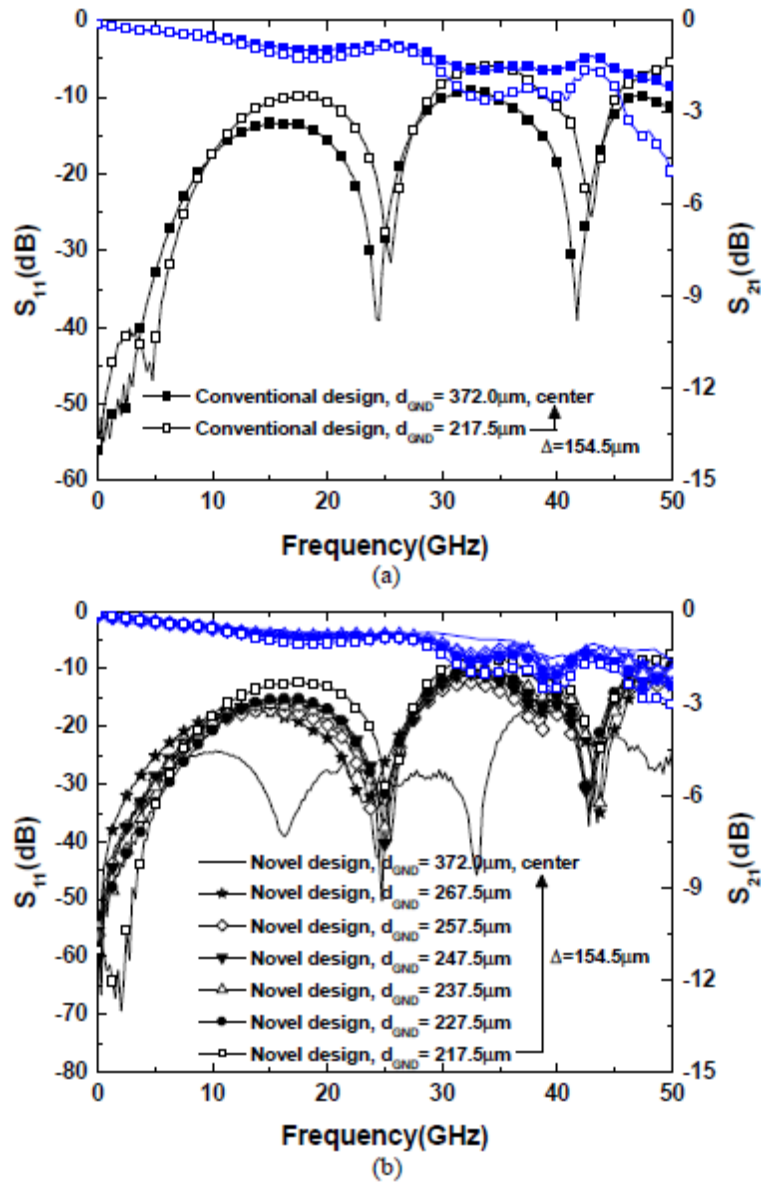


Figure 3-4 : Résultats de mesures électromagnétiques (a) pour les structures conventionnelles, (b) pour les structures optimisées, selon différentes distances D_{gnd}

A. Margomenos présente quant à lui une transition TSV pour lignes coplanaires et micro-rubans, qu'il a appelée "top-via" [12]. La structure présentée utilise la topologie illustrée Figure 3-5. La structure de propagation amène le signal en surface, qui transite par les TSV à travers le substrat, passe sur le substrat du dessous par les bumps en or, puis remonte de l'autre côté. C'est ainsi que sont réalisées simulations et mesures électromagnétiques.

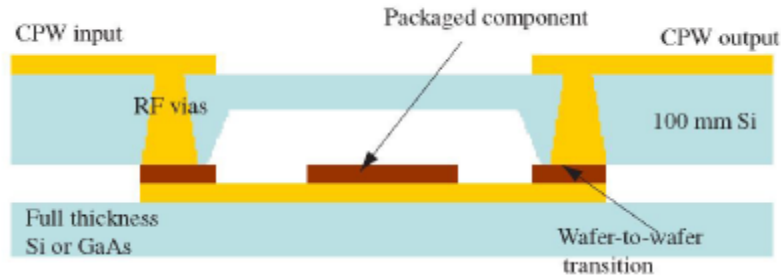


Figure 3-5 : Schéma de topologie des transitions "top-via"

Les structures de propagation en surface peuvent être des lignes coplanaires simples et optimisées, ou des lignes micro-rubans simples et optimisées. Ces structures sont présentées, associées aux résultats de simulations et de mesures électromagnétiques réalisées. L'auteur a développé des structures afin d'optimiser les transitions entre lignes coplanaires, lignes micro-rubans, ainsi que l'association des deux. Ces structures sont réalisées sur des substrats de silicium haute résistivité d'une épaisseur de 100 μm .

Nous présentons ces transitions Figure 3-6 à Figure 3-9 (entre lignes coplanaires, entre lignes micro-rubans, entre ligne micro-ruban et ligne coplanaire, et entre ligne coplanaire et ligne micro-ruban). Les simulations et mesures électromagnétiques présentent de bons résultats sur la bande de fréquences DC à 40 GHz avec des coefficients de réflexion inférieurs à -10 dB sur toute la bande, et des pertes de transmission inférieures à 1 dB jusqu'à 40 GHz.

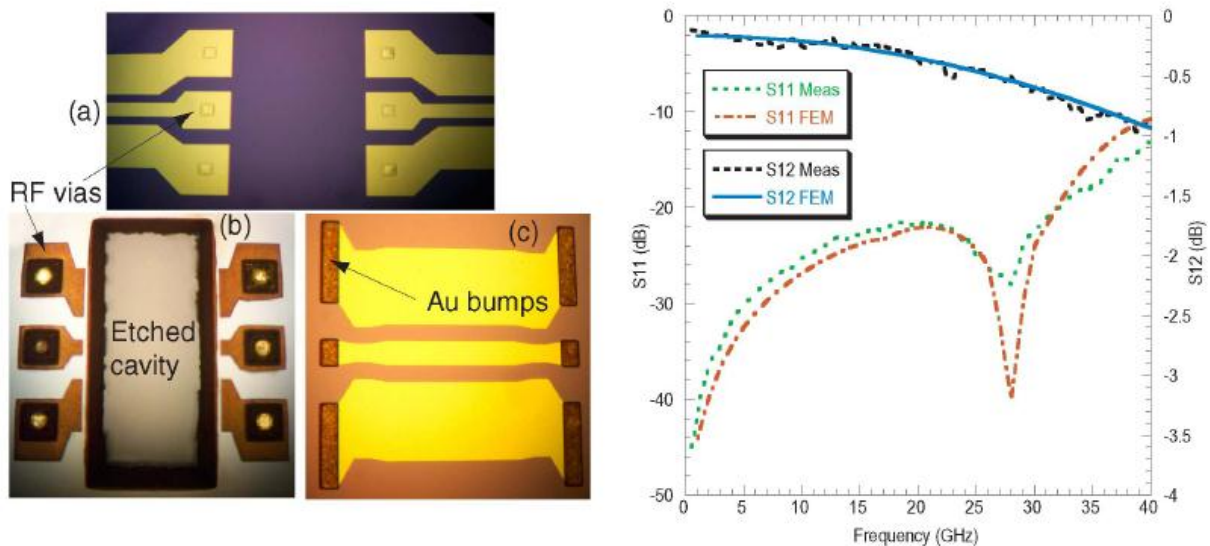


Figure 3-6 : Transition Coplanaire-Coplanaire (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, (c) vue sur le wafer d'accueil avec bumps, et résultats de simulations et mesures électromagnétiques

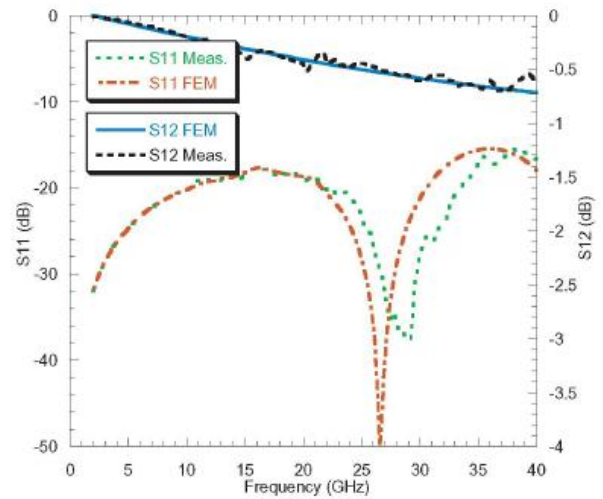
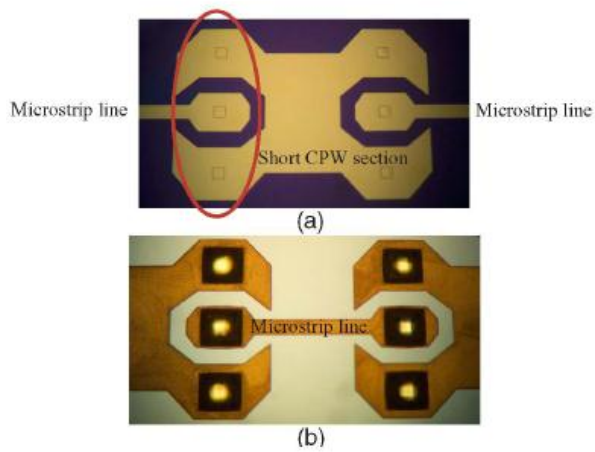


Figure 3-7 : Transition Microruban-Microruban (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, et résultats de simulations et mesures électromagnétiques

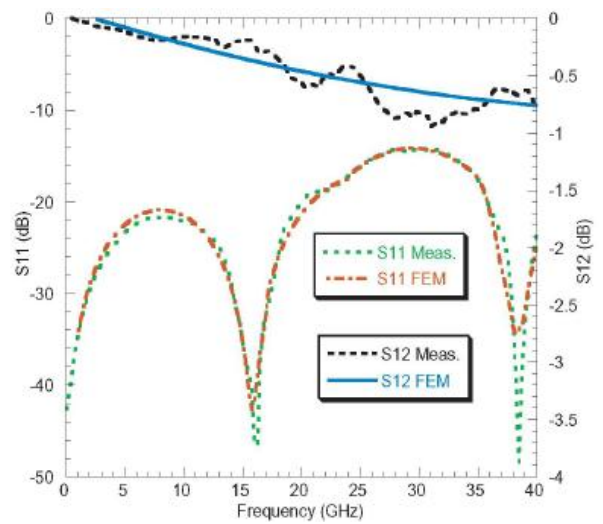
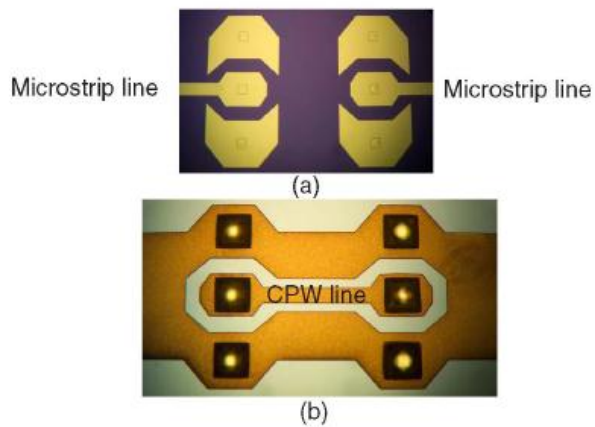


Figure 3-8 : Transition Microruban-Coplanaire (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, et résultats de simulations et mesures électromagnétiques

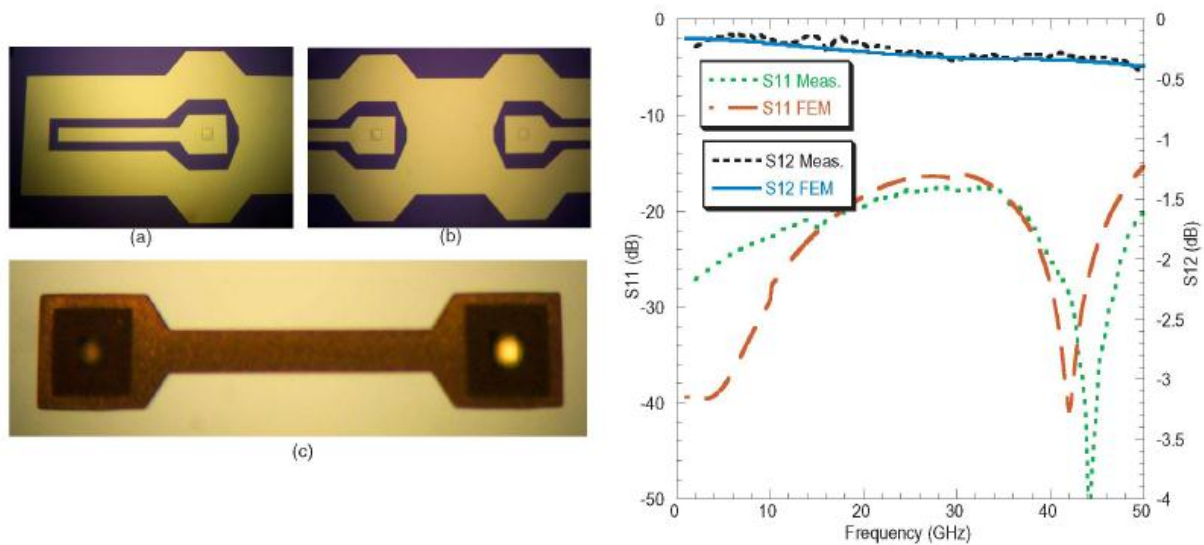


Figure 3-9 : Transition Coplanaire-Microruban (a) et (b) vue de dessus, (c) vue de dessous, et résultats de simulations et mesures électromagnétiques

T. Kangasvieri & al ont développé quant à eux des transitions TSV pour lignes coplanaires ainsi que les bumps associés pour le report du substrat sur un substrat d'accueil [13]. Les transitions TSV pour lignes coplanaires sont illustrées Figure 3-10. Cette transition est développée sur un substrat de LTCC (Low temperature co-fired ceramic), matériau très utilisé pour la mise en boîtier.

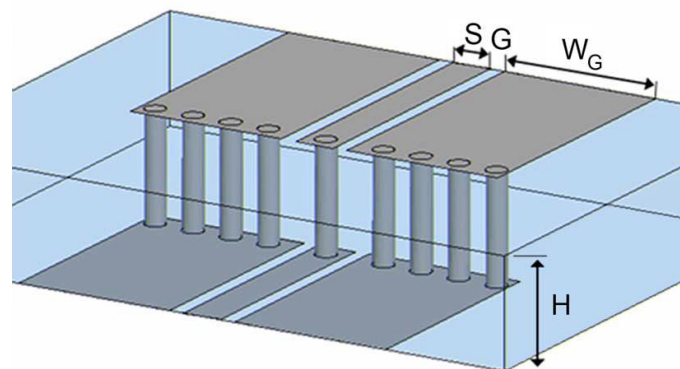


Figure 3-10 : Transition TSV multi-vias développée pour les lignes coplanaires

Cette étude prend en compte plusieurs paramètres, notamment la distance entre le via de la ligne centrale et le premier via de masse (pitch), le nombre de vias utilisés pour chaque plan de masse (G pour Ground et S pour Signal), et le diamètre des vias (100 ou 200 μm). Les résultats de mesures sont présentés Figure 3-11. Dans le cas optimal, c'est-à-dire des vias de 100 μm de diamètre, quatre vias par plan de masse et un pitch de 320 μm (configuration présentée Figure 3-10), une analyse complète a été menée et les résultats de simulations et mesures électromagnétiques sont présentés Figure 3-12, avec un coefficient de réflexion

sous la barre des -20 dB jusqu'à 50 GHz et des pertes inférieures à 3 dB sur cette même bande.

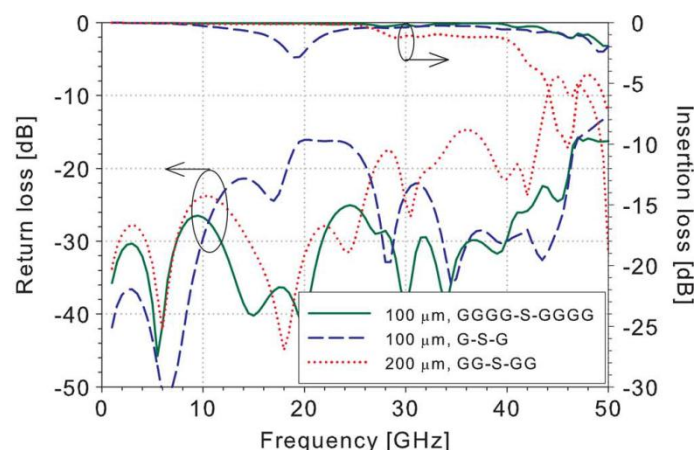


Figure 3-11 : Résultats de mesures électromagnétiques selon le diamètre des vias (100/200 μm) ainsi que le nombre de vias utilisé par plan de masse (indiqué par le nombre de G)

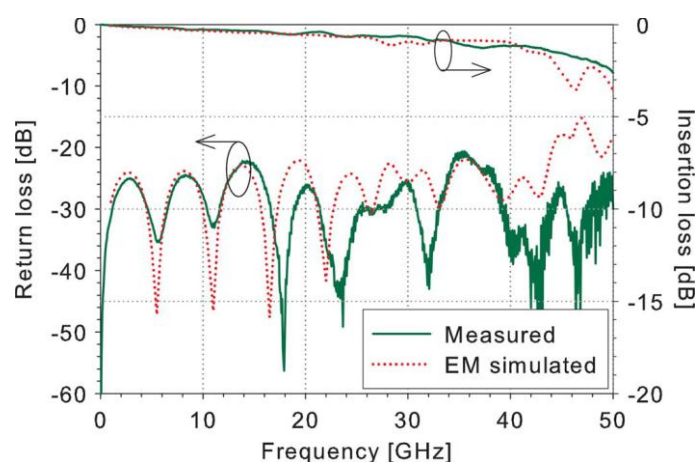


Figure 3-12 : Résultats de mesures électromagnétiques dans la configuration : diamètre de via de 100 μm et quatre vias par plan de masse

Les TSV présentent l'avantage d'une réalisation technologique relativement simple. Le principe est de percer le substrat de part en part, optionnellement de créer une couche d'oxyde sur les surfaces gravées et de remplir les trous créés par un métal conducteur comme l'or ou le cuivre. Le diamètre des vias, l'épaisseur du substrat, et la position de vias les uns par rapport aux autres sont des facteurs-clés de cette technologie. De plus, cette technologie est principalement développée pour les substrats silicium. Mais le matériau utilisé en tant que substrat est primordial. En effet l'isolation entre trous métallisés est fondamentale pour limiter le rayonnement parasite et donc les couplages électromagnétiques.

3.2.2 Transitions par couplage :

Plusieurs types de transitions verticales utilisent le couplage électromagnétique pour propager une onde de part et d'autre du substrat. C'est le cas des travaux de Abbosh, qui utilise le couplage de patches micro-rubans à travers une fente dans le substrat pour réaliser une transition verticale [14]. La Figure 3-13 présente la topologie proposée par l'auteur. Les patches sont face à face et sont couplés à travers une fente créée dans le plan de masse entre les deux substrats. Les résultats de simulations sont présentés Figure 3-14.

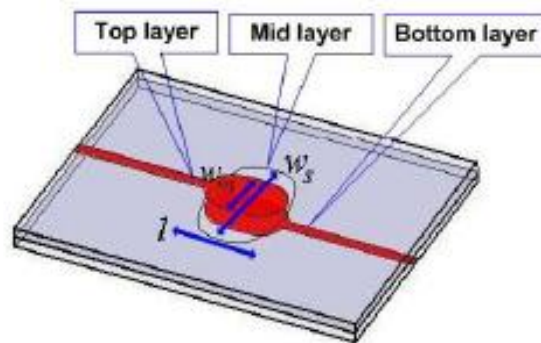


Figure 3-13 : Design de transition par couplage utilisant des patches métalliques couplés à travers une fente dans le plan de masse

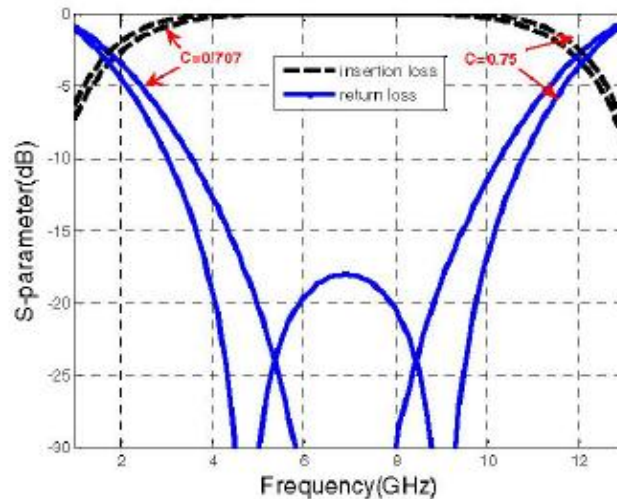


Figure 3-14 : Mesures du couplage électromagnétique pour deux dimensions de patches

Les performances électromagnétiques de la structure présentent un coefficient de réflexion sous la barre des -15 dB autour de 7 GHz et des pertes inférieures à 0,4 dB sur cette même bande.

Raskin propose une topologie originale de lignes coplanaires pour créer un couplage EM à travers un substrat de silicium [15]. La Figure 3-15 présente la structure, et la Figure 3-16 les champs électriques des modes de propagation de l'énergie, en mode pair et en mode impair.

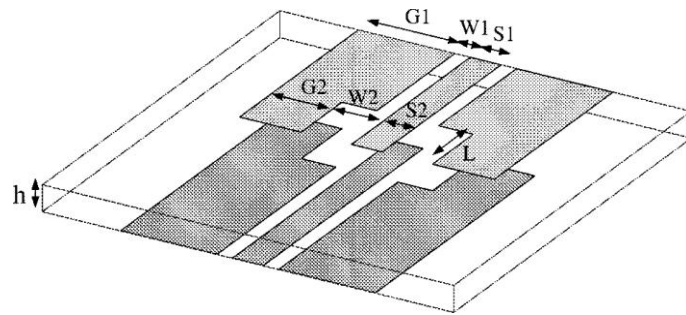


Figure 3-15 : Design de transition par couplage utilisant les lignes coplanaires

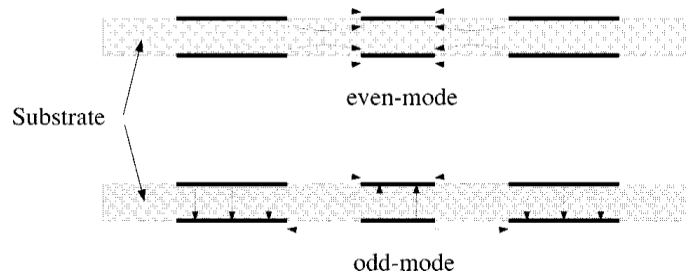


Figure 3-16 : Carte du champ électrique dans la transition, selon les modes pair et impair

La Figure 3-17 présente les résultats de simulations et de mesures obtenus sur cette structure, avec un coefficient de réflexion de -22 dB et des pertes de 0,9 dB à 100 GHz.

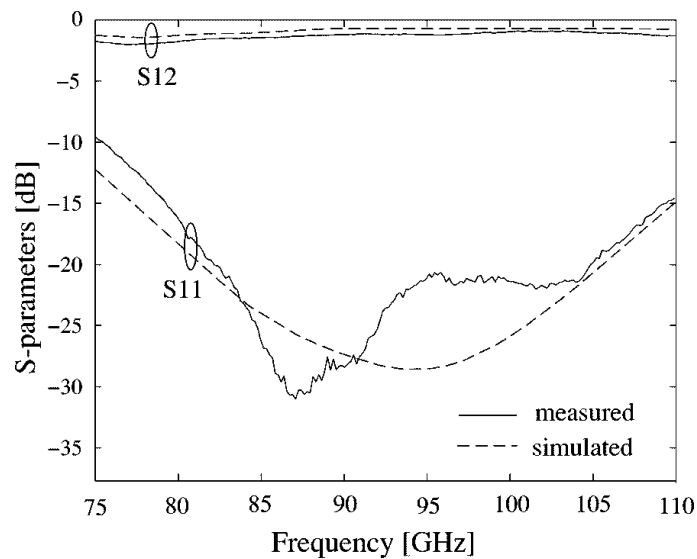


Figure 3-17 : Simulations et mesures électromagnétiques obtenues avec cette transition

Enfin, Swierczynski utilise la résonance d'une cavité blindée dans le substrat pour créer un couplage EM entre des lignes micro-rubans sur les deux faces du substrat [16]. La Figure 3-18 présente une vue de dessus de la structure. On peut observer que le couplage est assuré entre deux lignes micro-rubans situées de part et d'autre du substrat de LTCC. Des vias métalliques traversant modélisent une cavité à travers ce substrat, et deux fentes sont réalisées dans le plan de masse en surface afin de créer le couplage. La Figure 3-19 illustre une vue de coupe du design.

Toutes les dimensions ont été optimisées pour obtenir une fréquence de résonance à 20 GHz.

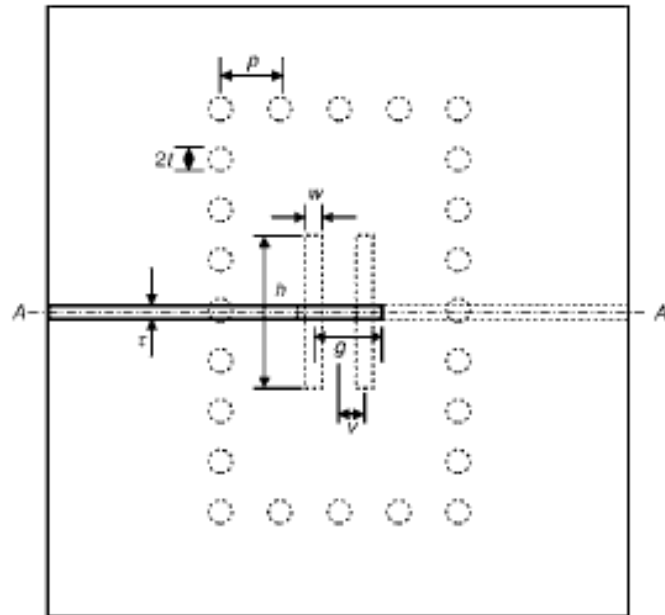


Figure 3-18 : vue de dessus de la transition par couplage utilisant une cavité résonante dans le substrat

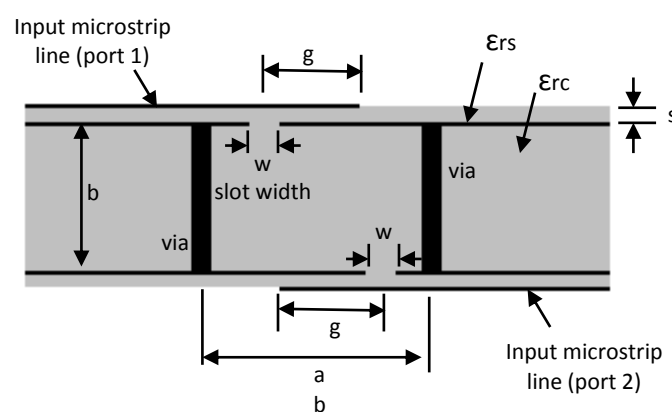


Figure 3-19 : Vue en coupe de la cavité, des plans de masse avec fentes et des lignes micro-rubans en surface

Les résultats de simulations sont présentés Figure 3-20. Ils ont été réalisés sur deux logiciels différents que sont HFSS et Ensemble. On peut observer un coefficient de réflexion en dessous des -10 dB et des pertes supérieures à 2,5 dB sur une largeur de bande de 15% autour de 20 GHz.

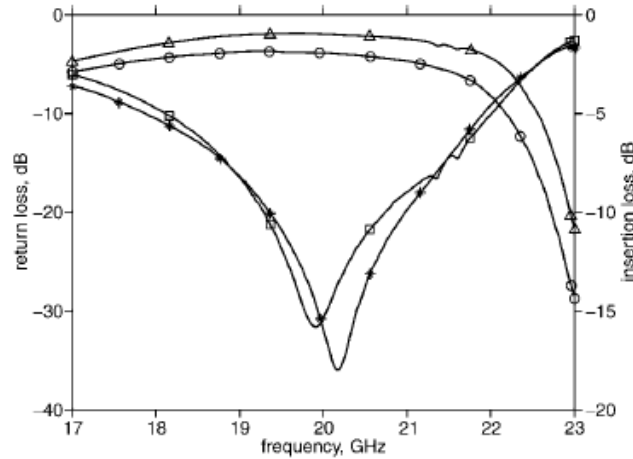


Fig. 3 Return loss of vertical transition in Fig. 2a, with via fenced cavity sidewalls, predicted using HFSS and Ensemble and predicted insertion loss of same transition using HFSS and Ensemble
□ return loss, HFSS * return loss, Ensemble
△ insertion loss, HFSS ○ insertion loss, Ensemble
Conductor and dielectric losses included in computations. Dimensions given in text

Figure 3-20 : Résultats de simulations électromagnétiques (HFSS et Ensemble) de la transition par couplage à cavité

L'avantage de ce type de transitions est la facilité de réalisation du système. En effet, peu de travail sur le substrat est nécessaire ; le procédé technologique se résume aux lignes en surface. Les inconvénients par rapport à nos applications viennent de plusieurs points :

- L'encombrement : en effet, ces transitions utilisant le couplage EM, elles sont dépendantes de la longueur d'onde guidée du signal à la fréquence désirée.
- La fréquence de résonance : Ces transitions ont de bonnes performances sur une bande donnée relativement étroite, ce qui les rend sélectives.
- Le rayonnement : ces transitions rayonnent dans le substrat, ce qui crée une pollution EM pour les systèmes voisins.
- Les performances : Fortement dépendantes de la qualité du substrat, ces transitions ont des performances EM moyennes, ou alors, le choix du type de substrat sera imposé pour obtenir de bonnes performances (ϵ_r faible, $\tan(\delta)$ faible)

3.2.3 Transitions en pente :

Une transition originale, développée par Becker et Katehi, utilise la gravure chimique anisotrope du silicium (100) pour créer des cavités traversantes dans le substrat [17]. La gravure suivant les plans cristallins du silicium, cette méthode de gravure a la propriété de créer des flancs de cavités en pente, d'un angle d'environ 60°. Il suffit ensuite de déposer les lignes de propagation, ici des lignes coplanaires, pour les faire passer d'un niveau à l'autre. L'une des difficultés technologiques se situe au niveau du dépôt de la résine photosensible utilisée pour la création des lignes de propagation. Le dépôt par spin-coating étant non-conforme sur des supports possédant des reliefs trop importants, l'auteur propose ici une technique de dépôt de résine par électrophorèse. La Figure 3-21 présente une vue de lignes coplanaires réalisées par cette méthode. Les lignes peuvent donc descendre dans le fond de la cavité gravée dans le silicium en suivant le flanc de gravure. La Figure 3-22 présente une vue en coupe de ce type de réalisation, pour un empilement multi-substrats à travers lequel est créée une ligne coplanaire qui joint les différents niveaux.

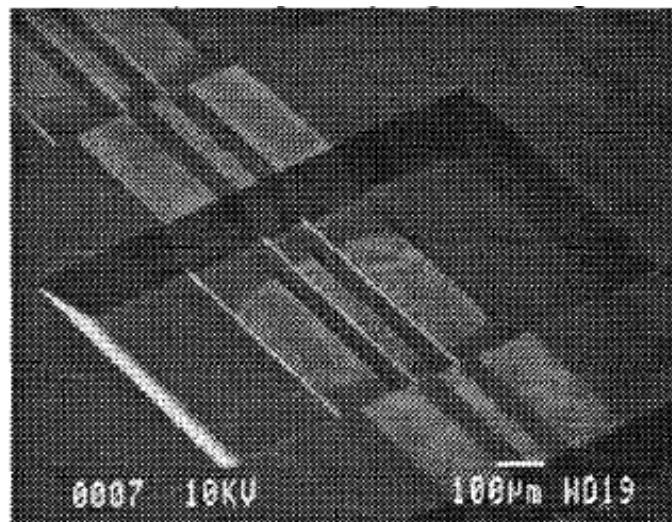


Figure 3-21: Lignes coplanaires réalisées, qui descendent le long des flancs dans la cavité

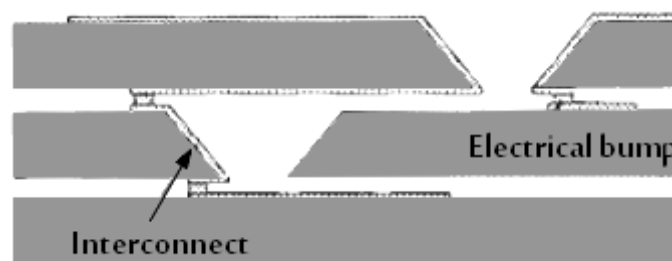


Figure 3-22 : Vue en coupe de l'empilement réalisé

La Figure 3-23 présente les résultats de mesures effectuées par l'auteur, pour une structure coplanaire de 8 mm de long, descendant et remontant dans une cavité de 110 μm de profondeur sur un substrat de silicium (Libra Model). En complément, la mesure d'une ligne coplanaire de 8 mm de long, plane, réalisée sur le même substrat, est affichée comme référence (Planar line). Les résultats de mesure indiquent une perte d'insertion de 0,17 dB sur la bande 2-40 GHz. Chaque transition apporte en moyenne 0,08 dB de pertes d'insertion.

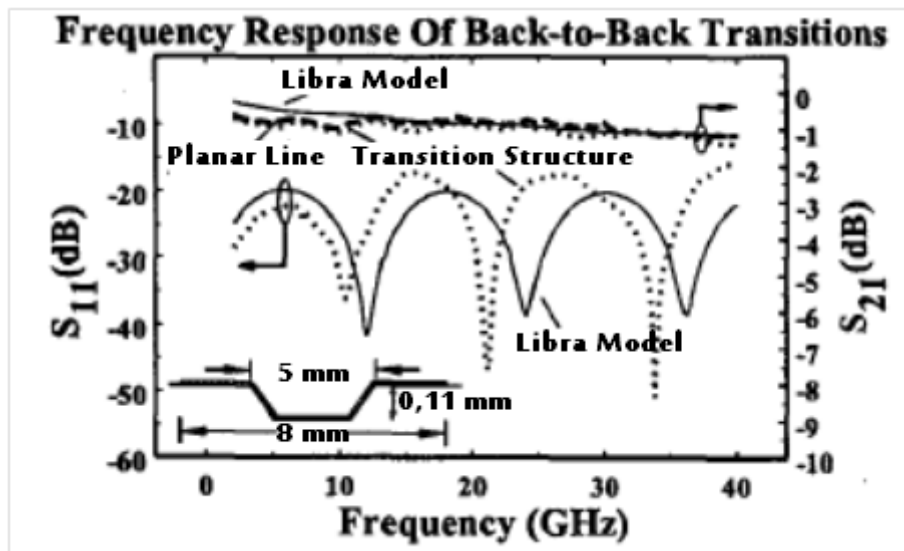


Figure 3-23 : Mesures électromagnétiques de la ligne coplanaire à transitions en pente (Libra Model) comparées à celle d'une ligne de référence (Planar Line)

Ce même type de transitions se retrouve dans d'autres travaux, comme ici cette étude sur le packaging de MEMS réalisée par A. Margomenos & al [18]. Cette structure utilise les transitions de lignes coplanaires sur pentes douces pour encapsuler et connecter un MEMS situé sur l'autre face du substrat. La Figure 3-24 présente cette structure. Les Figure 3-25 et Figure 3-26 illustrent quant à elles les réalisations technologiques effectuées par l'auteur. On peut y observer la descente de lignes coplanaires au fond des cavités creusées dans le silicium. Cette technique permet de réduire l'épaisseur traversée par le via vertical et ainsi d'utiliser pour la majeure partie de la transition une ligne coplanaire causant peu de pertes d'insertions sur la bande 2-40 GHz. Ces transitions présentent des pertes d'insertion moyennes de 0,08 dB par transition, autour de 20 GHz. En dehors de cette bande, les performances électromagnétiques chutent (Figure 3-27).

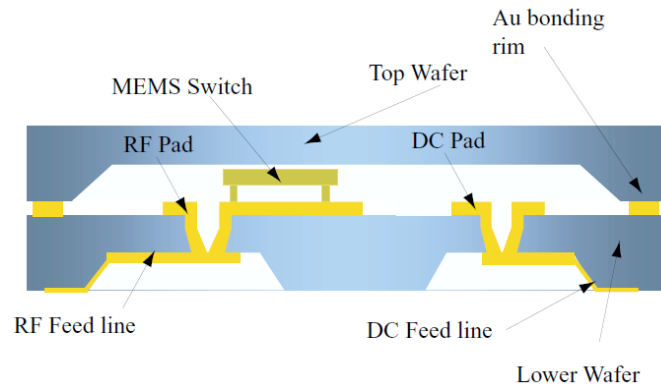


Figure 3-24 : Vue en coupe de l'utilisation des transitions en pente pour du packaging de MEMS

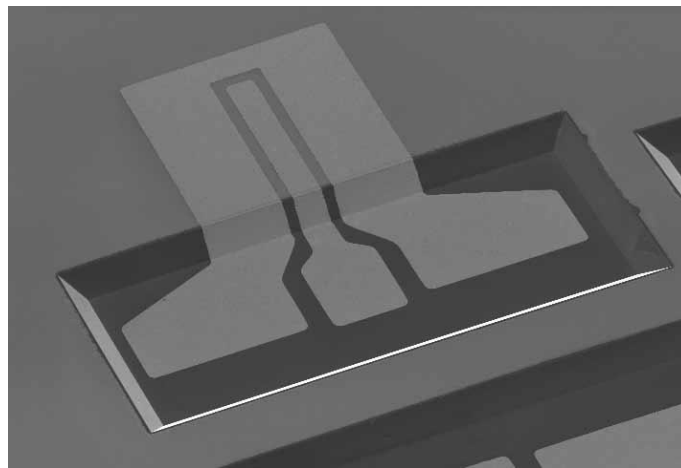


Figure 3-25 : Accès coplanaire réalisé en cavité pour le packaging de MEMS

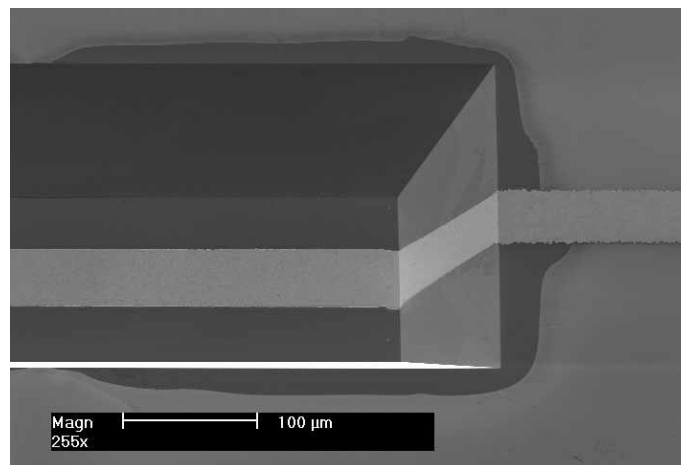


Figure 3-26 : Zoom sur la descente de la ligne coplanaire dans la cavité

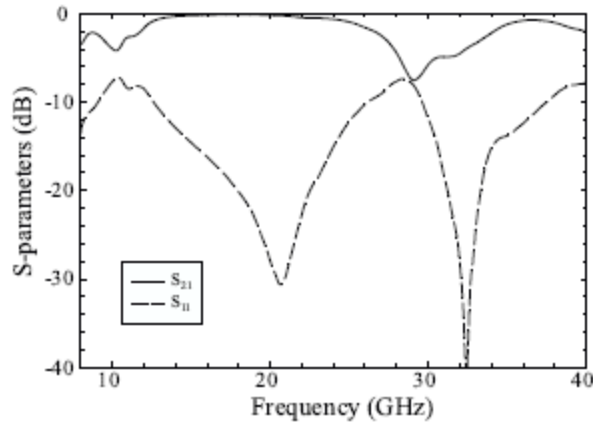


Figure 3-27 : Mesures électromagnétiques de cette transition

Les avantages de ce type de transition sont des pertes de propagation très faibles sur une bande de fréquences assez large (2 à 40 GHz) pour une épaisseur de substrat de 110 μm , ainsi que la facilité de réalisation qui se résume à deux étapes : gravure du substrat par voie chimique puis création des lignes de propagation par électrophorèse.

Par contre, au delà de 40 GHz, les pertes d'insertion augmentent. De plus, les dimensions de la transition sont relativement grandes ; la descente se faisant à 60°. La transition n'est pas du tout isolée du substrat, créant un rayonnement électromagnétique parasite et très dépendant de la nature du substrat. Enfin, le type de substrat n'offre que des choix très limités, le silicium <100> convenant pour le plan cristallin qui permet la gravure chimique anisotrope lors de la formation des cavités. Ces inconvénients rendent cette technologie de transitions inappropriée pour nos applications, et plus largement pour les transitions verticales génériques que nous voulons développer.

3.2.4 Transitions coaxiales

La dernière topologie étudiée ici est une transition de type coaxial. SoonWee Ho and al ont développé en 2008 une transition verticale basée sur le modèle coaxial, qui crée un via coaxial à travers le substrat [19]. Cette transition est présentée sur la Figure 3-28.

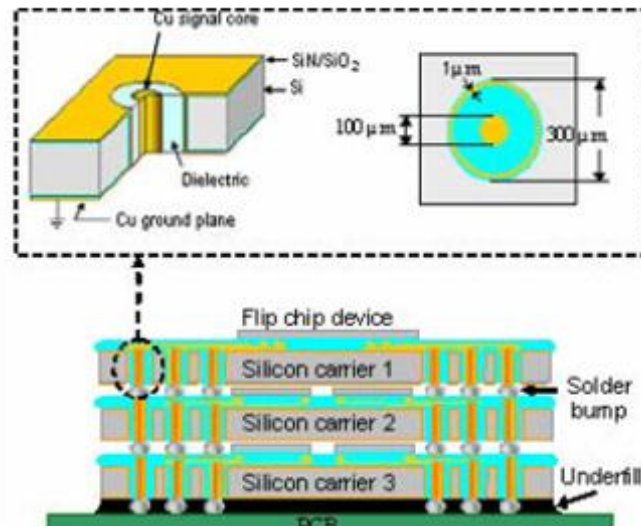


Figure 3-28 : Transition coaxiale à base de résine SU-8

Cette transition est destinée à améliorer les performances des TSV. Le modèle coaxial est basé sur la structure circulaire métal/diélectrique/métal. Ici le diélectrique utilisé est de la résine SU-8, ayant un ϵ_r de 3,25 et une tangente de pertes d'environ 0,035. La Figure 3-30 présente les résultats de mesures et de simulations. Ces résultats sont comparés avec ceux d'une structure masse/signal/masse utilisant des TSV simples, comme présenté Figure 3-29. Ces résultats intègrent les pertes liées aux bumps utilisés pour la connexion des vias sur le substrat support.

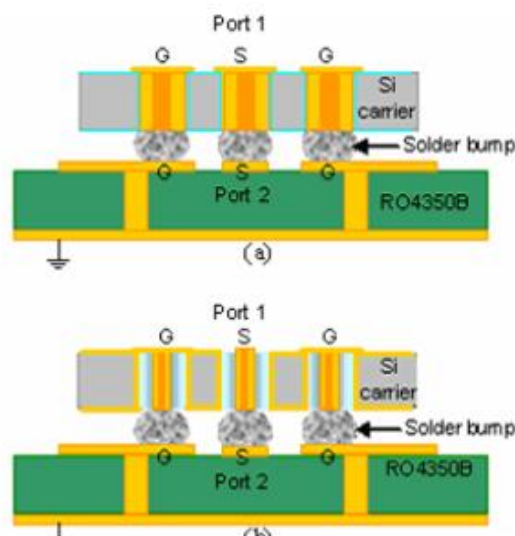


Figure 3-29 : Comparaison des structures TSV (a) et Coaxiale (b) disposées en mode coplanaire

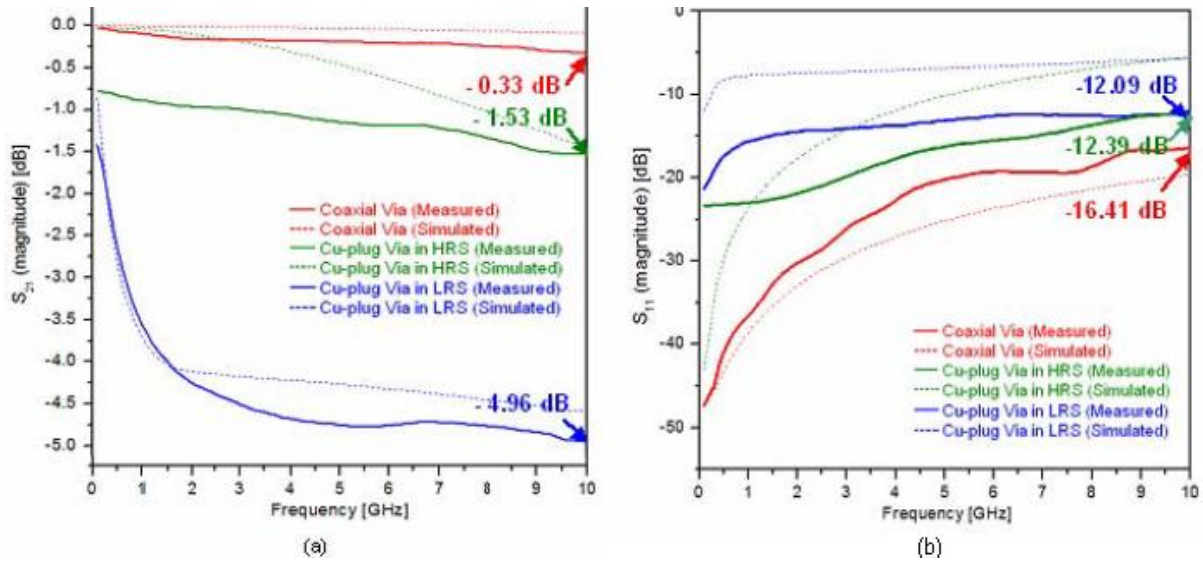


Figure 3-30 : Résultats de simulations et mesures électromagnétiques

Les résultats de mesures montrent de bonnes performances, avec des pertes de transmission de 0,33 dB et un coefficient de réflexion de -16,41 dB à 10 GHz.

Enfin, W.C. Wu & al ont développé en 2007 une transition coaxiale pour réaliser un report flip chip, le but étant l'interconnexion de lignes coplanaires par cette transition [20]. La Figure 3-31 présente cette structure, son procédé de réalisation ainsi que ses dimensions.

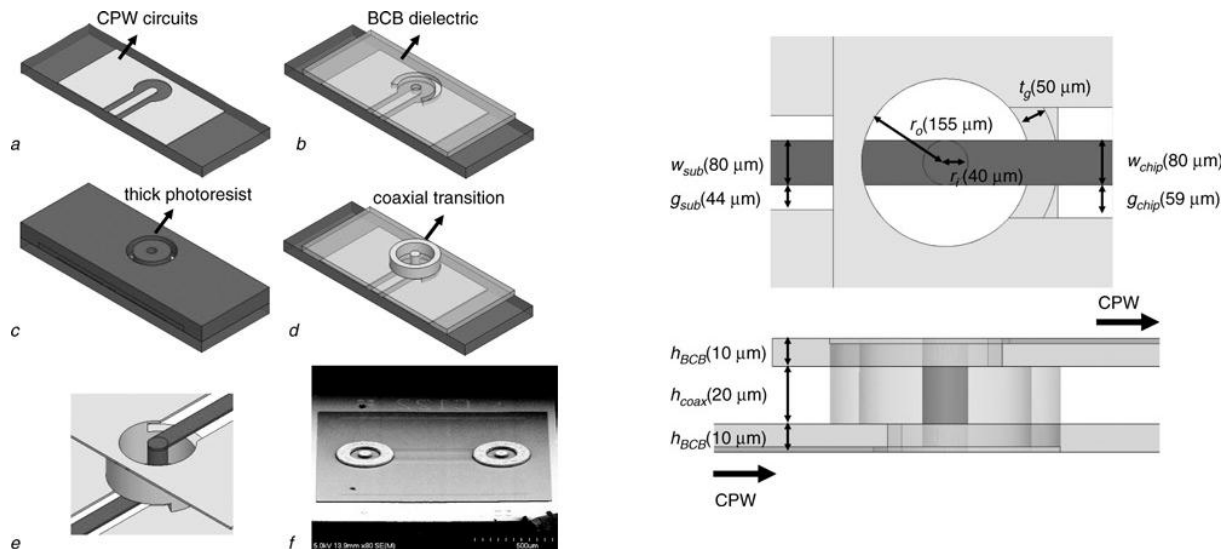


Figure 3-31 : Procédé de réalisation des interconnexions coaxiales (1) et dimensions (2)

Les résultats de simulations et de mesures électromagnétiques de la structure sont présentés Figure 3-32, avec un coefficient de réflexion sous la barre des -20 dB sur la bande DC à 70 GHz lorsque la structure n'a pas d'underfill, et des pertes de transmission inférieures à 0,7 dB sur cette même bande fréquence.

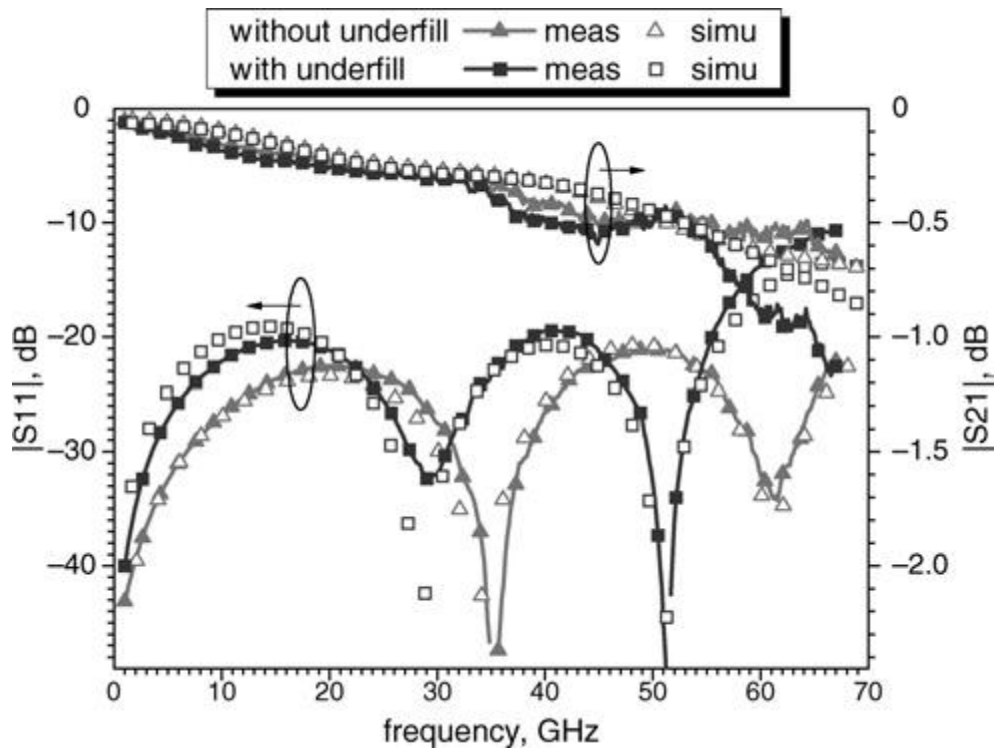


Figure 3-32 : Résultats de simulations et de mesures électromagnétiques

Ces transitions et interconnexions coaxiales semblent offrir de nombreux avantages. Tout d'abord leurs performances électromagnétiques, avec des pertes en transmission et en réflexion très faibles. Ensuite en terme de dimensions, la ligne coaxiale étant dimensionnée par rapport à l'impédance caractéristique désirée compte tenu de la permittivité relative du matériau diélectrique utilisé, la dimension des transitions peut être optimisée. Enfin en terme d'isolation électromagnétique, ces transitions semblent présenter une isolation suffisante pour nos applications.

3.2.5 Comparaison des technologies de transitions verticales

Nous avons étudié et présenté les technologies de transitions verticales qui semblaient les plus prometteuses pour nos applications. Le Tableau 3-1 présente un résumé comparatif de ces technologies, afin d'argumenter le choix que nous avons effectué.

Les cinq points déterminants dans notre choix sont les suivants : dimensions de la transition, performances électromagnétiques et bande de fréquences, isolation électromagnétique et rayonnement parasite dans l'environnement, indépendance par rapport au matériau employé comme substrat, et facilité de réalisation technologique. Aux vues des résultats récapitulés dans le Tableau 3-1, nous avons choisi d'étudier les connexions verticales de type coaxial.





















	TSV	Couplage	Pente	Coaxial
Dimensions				
Perf. EM				
Isolation EM				
Indépendance/ substrat				
Facilité de Réalisation				

Tableau 3-1 : Comparaison des technologies de transitions verticales

4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les intérêts des technologies d'intégration en trois dimensions, notamment le System in Package. Le SiP permet d'améliorer les performances d'un module, en termes de taille et de poids, mais également en termes de temps de transit, de fréquences de travail, de pertes électromagnétiques dues à la propagation, et enfin il permet une intégration de composants provenant de différentes filières technologiques, et de ce fait de tirer le meilleur parti de chaque filière, afin de créer un système optimal et compact.

Nous avons également abordé les points clés et les défis de cette technologie. La découpe, le report de puces, les interconnexions, les transitions verticales, tous ces points sont cruciaux pour parvenir à une intégration réussie. Nous nous sommes concentrés sur les transitions verticales, qui permettent de propager les signaux entre les différents niveaux d'un empilement de substrat. Nous avons abordé les TSV, les transitions en pente douce, les transitions par couplage électromagnétique et enfin les transitions verticales coaxiales. Ce dernier concept nous a intéressés par ses performances électromagnétiques mais aussi par les avantages qu'il offre par rapport à ses concurrents, notamment au niveau des dimensions optimisables et de la bonne isolation électromagnétique par rapport au substrat, ce qui garantit une indépendance par rapport au choix du matériau utilisé comme substrat et un rayonnement électromagnétique parasite limité.

Nous détaillons dans le chapitre suivant l'étude menée sur ce type de transition verticale.

5 Références bibliographiques

1. *System-In-Package (SIP): Challenges and Opportunities*. 2005; Available from: http://www.cs.york.ac.uk/rts/docs/SIGDA-Compendium-1994-2004/papers/2000/aspdac00/pdffiles/2e_1.pdf.
2. Leung, L.L.W., et al. *System-in-Package (SiP) Design: Issues, Approaches and Solutions*. in *Electronic Materials and Packaging, 2006. EMAP 2006. International Conference on*. 2006.
3. Beyne, E. *The rise of the 3rd dimension for system intergration*. in *Interconnect Technology Conference, 2006 International*. 2006.
4. Miettinen, J., et al. *System design issues for 3D system-in-package (SiP)*. in *Electronic Components and Technology Conference, 2004. Proceedings. 54th*. 2004.
5. Ramm, P., et al. *3D integration technology: Status and application development*. in *European Solid-State Circuits Conference 2010, Seville*.
6. Metcalfe, K.F.a.J. *Facilitating System-in-Package (SiP) design*. 6/5/2006; Available from: <http://www.eetimes.com/electronics-news/4060956/Facilitating-System-in-Package-SiP-design?pageNumber=1>.
7. Tai, K.L. *System-In-Package (SIP): challenges and opportunities*. in *Design Automation Conference, 2000. Proceedings of the ASP-DAC 2000. Asia and South Pacific*. 2000.
8. Wei, K. *System in package (SiP) technology applications*. in *Electronic Packaging Technology, 2005 6th International Conference on*. 2005.
9. *The next Step in Assembly and Packaging : System Level Integration in the package (SiP)*. White Paper , in *International Technology Roadmap for Semiconductors*, http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/LinkedFiles/AP/AP_Paper.pdf
10. *SIPCOM*. 2008; Available from: <http://sipcom.iemn.univ-lille1.fr/>.
11. Young Seek, C. and R.R. Franklin. *Novel broadband through silicon via interconnect for three dimensional CPW transition*. in *Microwave Conference (EuMC), 2010 European*. 2010.
12. Margomenos, A., L. Yongshik, and L.P.B. Katehi. *Wideband Si Micromachined Transitions for RF Wafer-Scale Packages*. in *Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2007 Topical Meeting on*. 2007.
13. Kangasvieri, T., et al., *Low-Loss and Wideband Package Transitions for Microwave and Millimeter-Wave MCMs*. *Advanced Packaging, IEEE Transactions on*, 2008. **31**(1): p. 170-181.
14. Abbosh, A.M. *Vertical microstrip-microstrip transition for ultra wideband applications*. in *Asia Pacific Microwave Conference 2007*. Bangkok.

15. Raskin, J.P., et al., *W-band single-layer vertical transitions*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000. **48**(1): p. 161-164.
16. Swierczynski, T., D.A. McNamara, and M. Clenet, *Via-walled cavities as vertical transitions in multilayer millimetre-wave circuits*. Electronics Letters, 2003. **39**(25): p. 1829.
17. Becker, J.P. and L.P.B. Katehi, *Multilevel finite ground coplanar line transitions for high-density packaging using silicon micromachining*. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2000. **1**: p. 303-306.
18. Margomenos, A., et al. *Silicon micromachined interconnects for on-wafer packaging of MEMS devices*. in *Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2001. Digest of Papers. 2001 Topical Meeting on*. 2001.
19. Ho, S.W., et al. *High RF performance TSV silicon carrier for high frequency application*. 2008. Lake Buena Vista, FL.
20. Wu, W.C., et al., *Coaxial transitions for CPW-to-CPW flip chip interconnects*. Electronics Letters, 2007. **43**(17): p. 929.

CHAPITRE II – CONCEPTION ET SIMULATIONS DES TRANSITIONS VERTICALES COAXIALES

1 Introduction

L'étude bibliographique des différentes topologies de transitions verticales du chapitre précédent nous a permis de faire un choix quant au modèle le plus approprié à notre application d'intégration 3D, hétérogène, sur support silicium. Les transitions coaxiales assurent de bonnes performances électromagnétiques pour un encombrement faible, ainsi qu'une bonne isolation du substrat.

Dans ce chapitre nous présentons l'étude de la conception de ces transitions, optimisées pour l'intégration 3D. Tout d'abord, nous présentons le cheminement de la conception. Cette étude débute par la conception d'une structure qui, bien qu'étant impossible à réaliser technologiquement, nous donne une référence en termes de performances à atteindre. Nous développons ensuite une structure réalisable, puis optimisons cette conception afin d'améliorer ses performances globales. Enfin, nous présentons la structure retenue et la déclinaison utilisée et réalisée pour les mesures de caractérisation.

2 Méthodologie de conception

2.1 Contraintes liées à l'environnement

La conception d'une transition verticale, comme toute autre structure liée à la mise en boîtier, se fait selon plusieurs critères. Dans un premier temps, nous étudions les contraintes liées à l'environnement, c'est-à-dire ici à l'intégration 3D hétérogène. Ce type d'intégration propose une très haute densité d'intégration. Il est nécessaire que notre structure aille dans ce sens. Pour cela plusieurs points sont à optimiser.

2.1.1 Intégration haute densité

Il nous faut d'abord réduire l'encombrement de la structure au maximum, ainsi elle n'imposera pas de limite de taille au module complet. L'encombrement de la structure dépend du volume de la transition verticale. Le volume de la transition est défini par l'épaisseur du substrat à traverser, ici 150 μm fixée par le contexte du projet SIPCOM, et par la surface occupée par la

transition. Dans notre cas, la transition étant du type coaxial, la surface occupée est celle du disque défini par le diamètre de la transition coaxiale. Si l'on définit l'encombrement de la transition par la surface qu'elle occupe, l'épaisseur du substrat étant la même quelle que soit la transition utilisée, l'équation 2.1 permet de calculer cet encombrement.

$$E = \pi \times \left(\frac{D_{coax}}{2}\right)^2 \quad (2.1)$$

Où D_{coax} le diamètre de la transition coaxiale.

Ensuite il est nécessaire de travailler l'isolation de la structure par rapport à son environnement. On parle ici de couplage électromagnétique parasite. Le rayonnement émis par une structure doit être minimisé et ainsi ne pas perturber les structures voisines.

2.1.2 Structure Large bande

Enfin, la structure doit proposer des performances élevées sur une bande de fréquences étendue. On parlera ici de structure large bande. Comme nous le verrons ensuite, l'utilisation de structures coaxiales pour les transitions verticales permet une propagation ultra large bande.

2.2 Contraintes liées à la réalisation technologique

Dans un second temps, la structure doit être conçue de façon à être réalisable technologiquement. Cela impose des limites, en termes de topologie et de dimensions. Pour ces dernières, les limites sont les suivantes :

L'épaisseur maximum d'un film de BCB pleine plaque uniforme et homogène est de 30 μm .

Le diamètre de l'âme centrale, à terme, sera limité à 30 μm minimum. Cela est dû aux contraintes de gravure sèche du BCB, qui seront expliquées dans le chapitre 3.

Dans un premier temps, toutes les études fréquentielles seront présentées sur la bande 50 à 70 GHz.

3 Définition des structures de propagation en surface

Nous présentons dans la Figure 3-1 les géométries usuelles des différents types de lignes planaires : micro-ruban, coplanaire, ligne enterrée et ligne à fente.

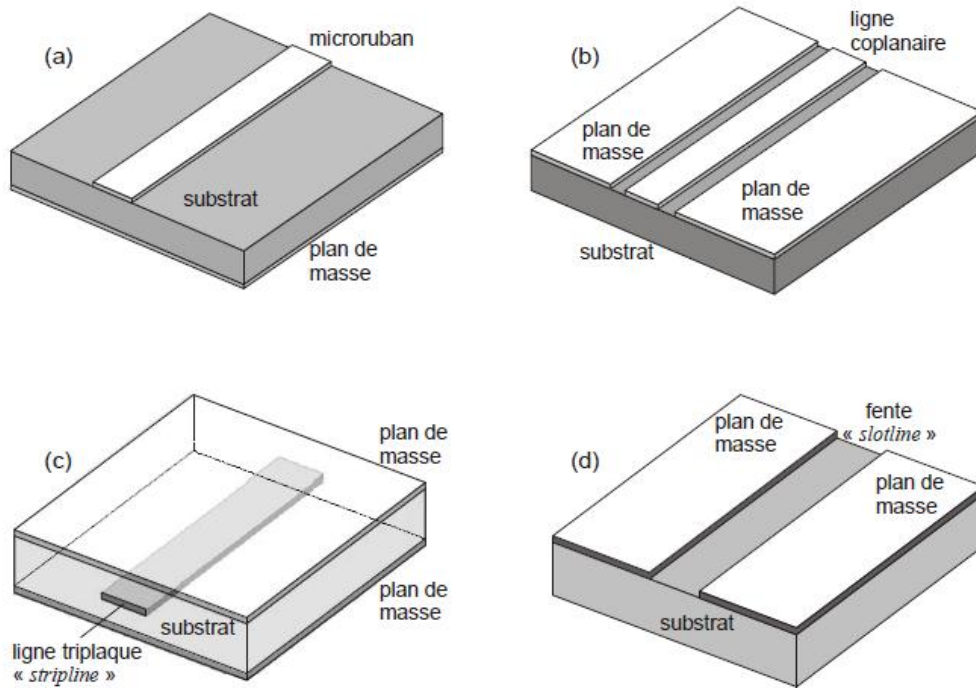


Figure 3-1 : Quelques exemples de technologies planaires: (a) ligne micro-ruban (b) ligne coplanaire (c) ligne triplaque (d) ligne à fente.

3.1 Ligne Micro-ruban

La ligne de propagation micro-ruban (Micro Strip ou MS) est constituée d'un plan de masse, d'un substrat et d'un ruban métallique (Figure 3-1 (a)). Le mode fondamental de propagation n'est pas TEM (Transverse Electro-Magnétique) car la section transverse n'est pas homogène. Cependant, les amplitudes des composantes longitudinales des champs électriques et magnétiques sont suffisamment faibles pour être négligées, nous parlons alors de mode quasi-TEM.

Les contraintes technologiques imposent une épaisseur de diélectrique de 30 μm maximum en surface, ce qui nécessite d'utiliser une largeur de ruban faible afin de réaliser une structure adaptée à 50 Ohms, ce qui va augmenter légèrement les pertes métalliques de la ligne.

3.2 Ligne Coplanaire

La topologie coplanaire (CoPlanar Waveguide ou CPW) est constituée de deux plans de masse et d'un ruban central situés sur la même face du substrat (Figure 3-1 (b)). Comme le montre la Figure 3-2, deux modes peuvent être excités simultanément, du fait de la présence de trois conducteurs. Un mode quasi TEM (dit coplanaire ou mode impair) peu dispersif, et un autre mode quasi TE (dit de fente ou mode pair) dispersif. Ce dernier mode est supprimé en forçant les deux plans de masse au même potentiel. La gamme des impédances caractéristiques réalisables est plus faible que pour une ligne micro-ruban vers les basses impédances caractéristiques, la difficulté étant liée à la largeur des fentes. En revanche, cette topologie offre un avantage de flexibilité du fait que deux paramètres géométriques, la largeur du ruban et celle des fentes, permettent en les ajustant de réaliser une même impédance caractéristique alors que l'on ne dispose que d'un paramètre (largeur du ruban) pour la ligne micro-ruban. De plus, cette topologie possède l'avantage d'être uniplanaire (un seul niveau de métallisation).

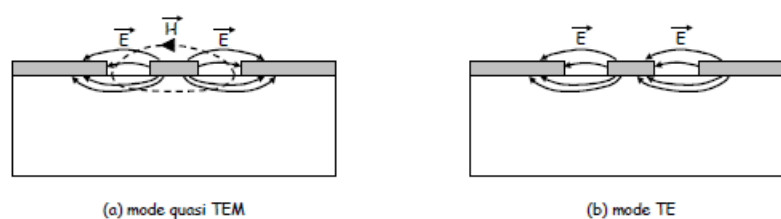


Figure 3-2 : lignes de champ des deux modes de propagation

Les contraintes technologiques nous imposent de réaliser les lignes coplanaire soit :

- Directement sur le silicium, ce qui nous oblige à utiliser un substrat silicium haute résistivité. Cette solution ne correspond pas au critère de faible coût que nous souhaitons pour notre approche SiP.
- Sur une couche de BCB d'épaisseur 30 μm . Dans ce cas deux solutions sont possibles :
 - On dépose une couche de métallisation entre le silicium et le BCB pour supprimer l'influence du support de silicium. L'épaisseur du BCB étant de 30 μm et la permittivité du diélectrique étant faible, nous nous trouvons dans le cas d'une structure coplanaire avec plan de masse. Pour obtenir une ligne de propagation peu sensible au plan de masse, nous devons réaliser des lignes dont la largeur de fente est très fine ce qui augmente les pertes de propagation. A titre d'exemple pour une ligne d'impédance 50 ohm nous obtenons le couple de valeurs suivant : largeur de ligne (W) = 12 μm et largeur de

fente (G) = 3 μm . Cette largeur de fente est difficile à réaliser technologiquement. Mais en plus ces dimensions imposent une tolérance très faible. En effet, une variation de 1 μm de largeur de fente modifie l'impédance caractéristique de 7 ohms. Ce type de ligne n'est pas réaliste.

- On ne dépose pas de couche de métallisation, dans ce cas, comme la couche de BCB est de faible épaisseur (30 μm) nous nous retrouvons dans le cas où le substrat silicium influence les performances de propagation.

En conclusion, nos contraintes technologiques et le critère de faible coût sont donc incompatibles avec l'utilisation de lignes coplanaires pour notre approche.

3.3 Ligne Triplaqué

La ligne triplaqué (« *stripline* ») est la première micro ligne développée (par Barrett et Barnes en 1951) et la seule ligne homogène (un seul diélectrique) supportant un mode fondamental réellement TEM. Les pertes diélectriques sont, en général, très faibles comparées aux pertes dans le conducteur, aux fréquences micro-ondes. Comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre ce type de ligne de propagation permet une très bonne isolation de la structure.

3.4 Ligne Fente

La ligne à fente (« *slotline* ») est une structure constituée d'un substrat diélectrique métallisé sur une seule face. La face métallisée comporte une fente étroite gravée qui constitue la ligne. Cette structure est particulièrement utile dans les circuits intégrés nécessitant des lignes à haute impédance (il est difficile d'obtenir des impédances caractéristiques inférieures à 60 Ω pour les lignes à fente). C'est pour cette raison que nous n'avons pas retenu ce mode de propagation dans la suite de l'étude.

Aux vues de ce bref descriptif des modes de propagation, nous avons dans un premier temps utilisé le mode de propagation micro-ruban pour effectuer nos différentes simulations électromagnétiques, et dans un second temps nous avons étudié la topologie finale avec des lignes triplaques.

4 Étude de la structure idéale – cas non réalisable

4.1 Définition du cas idéal

Cette étude débute par une transition idéale, c'est-à-dire une transition coaxiale dans le silicium, utilisant un plan de masse continu. Cette structure n'est pas réalisable en technologie, le matériau diélectrique à l'intérieur du coaxial étant du silicium. Mais elle nous a fourni une base de départ du point de vue résultats des simulations, ce qui nous a permis de développer notre structure pour nous rapprocher de ces performances, voire les dépasser.

La Figure 4-1 présente la transition coaxiale idéale, c'est-à-dire avec un plan de masse continu, dans un substrat de silicium. Le "via" représente l'âme centrale du modèle coaxial.

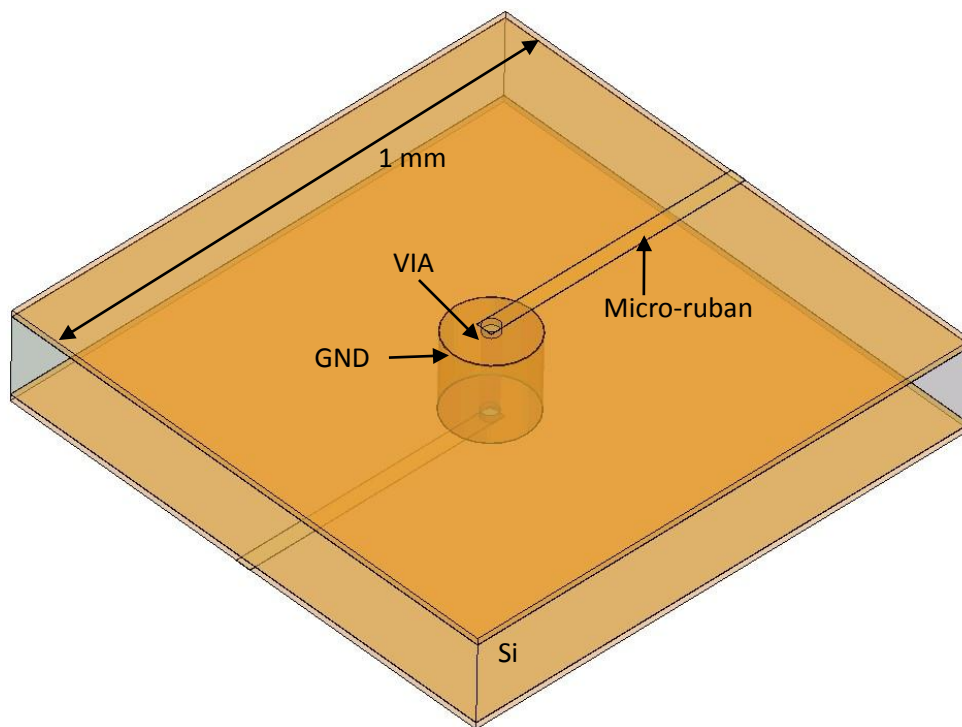


Figure 4-1 : Transition coaxiale idéale dans un substrat de silicium

Le BCB est utilisé comme matériau diélectrique pour ces lignes de propagation. Ce choix a été guidé par les excellentes propriétés électromagnétiques du BCB en hautes fréquences. En effet il présente une permittivité relative de 2,65 mesurée à 20 GHz, et une tangente de pertes diélectriques de 0,003 mesurée à 20 GHz. De plus, dans le projet SIPCOM, le BCB est utilisé pour le scellement des substrats et des boîtiers. En choisissant ce matériau comme diélectrique des lignes micro-rubans, nous assurons une compatibilité avec le reste du module.

Pour les simulations électromagnétiques, faites avec le logiciel HFSS, les propriétés du silicium et du BCB utilisées sont résumées dans le Tableau 4-1.

	BCB	Silicium
Permittivité relative	2,65	11,7
Conductivité volumique (S/m)	$1e^{-17}$	0,01
Tangente de pertes diélectriques	0,003	0,015

Tableau 4-1 : Propriétés des matériaux

L'étude est donc menée sur une structure du type ligne micro-ruban en face supérieure du substrat, transition coaxiale pour traverser le substrat, et ligne micro-ruban sur la face inférieure du substrat. La Figure 4-2 présente une vue de coupe de la structure. Le métal utilisé est de l'or.

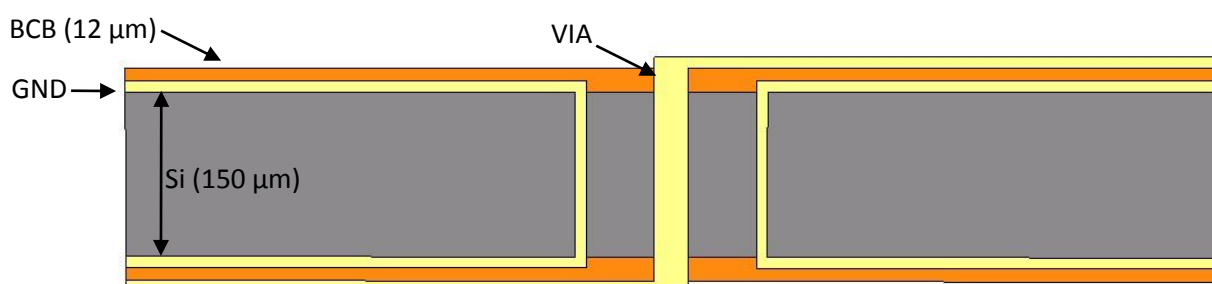


Figure 4-2: Vue de coupe de la structure coaxiale idéale

4.2 Méthodes d'optimisation - Impédance caractéristique

Dans un premier temps, afin d'optimiser la structure globale, il est nécessaire d'adapter les impédances de chaque partie afin de réduire au maximum la réflexion du signal. Les différentes parties à prendre en compte, présentant chacune une impédance caractéristique propre, sont illustrées dans la Figure 4-3.

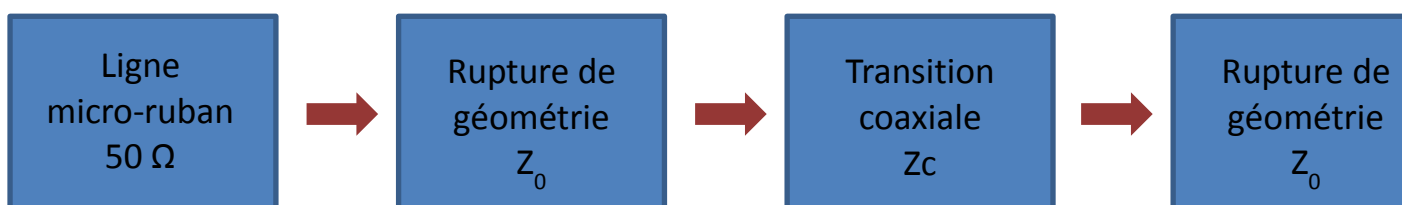


Figure 4-3 : Structures présentant des ruptures d'impédance caractéristique

Le signal se propage en surface sur la ligne micro-ruban, il atteint la rupture de géométrie composée de la jonction entre la ligne micro-ruban et la transition coaxiale, il se propage

ensuite dans la transition coaxiale, pour sortir en face arrière via la rupture de géométrie dans la ligne micro-ruban.

D'abord, les lignes micro-rubans présentent une impédance de 50Ω , pour être adaptées au reste du circuit. Ensuite la rupture de géométrie présente une impédance caractéristique Z_0 qui n'est pas facilement calculable. Enfin la transition coaxiale présente une impédance caractéristique Z_c définie par l'équation (2.2).

$$Z_c = \frac{60 \times \ln(n)}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

Cette équation donne la valeur de l'impédance caractéristique d'une ligne coaxiale en fonction du rapport du diamètre de l'âme centrale (le via) et du diamètre du plan de masse de la ligne coaxiale, noté n , et de la permittivité du matériau diélectrique, noté ϵ_r . L'équation (2.3) définit le rapport n et la Figure 4-4 illustre ce propos.

$$n = \frac{\text{diamètre du coaxial}}{\text{diamètre du via}} = \frac{D_{\text{coax}}}{D_{\text{via}}} \quad (2.3)$$

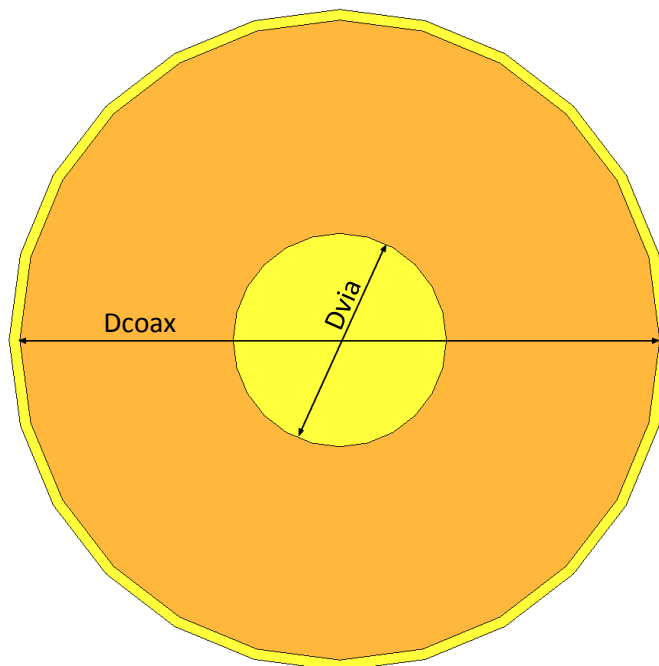


Figure 4-4 : Vue en coupe du modèle coaxial

La permittivité relative du matériau diélectrique est fixée par ses propriétés physiques. Faire varier l'impédance caractéristique de la ligne coaxiale revient donc à modifier le rapport n des diamètres du coaxial.

Lors de notre étude, il nous faudra adapter au mieux l'impédance globale de l'ensemble rupture/transition/rupture pour obtenir une impédance proche de 50Ω et ainsi minimiser les phénomènes de réflexion. L'impédance des ruptures de géométrie n'étant pas connue, et

variant avec l'impédance de la ligne coaxiale, il nous faudra trouver l'impédance caractéristique de la ligne coaxiale qui fournira une impédance globale la mieux adaptée.

Tout d'abord, nous fixons les dimensions de la ligne micro-ruban en surface. Cette ligne est conçue pour présenter une impédance caractéristique de 50Ω . La Figure 4-5 présente le schéma de la ligne, vue de coupe, et le Tableau 4-2 présente les dimensions retenues, obtenues en utilisant le logiciel de simulation HFSS.

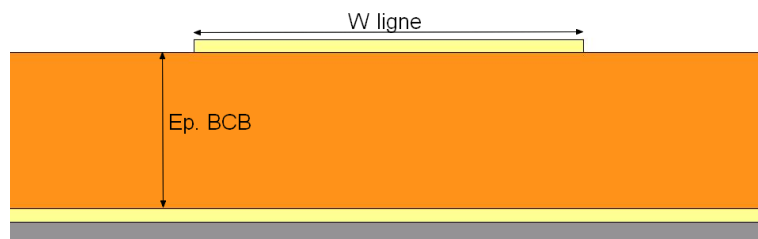


Figure 4-5 : Vue de coupe d'une ligne micro-ruban

Épaisseur du BCB	12 μm
Largeur de la ligne	30 μm
Épaisseur de métallisation de la ligne	200 nm
Épaisseur de métallisation du plan de masse	200 nm

Tableau 4-2 : Dimensions de la ligne micro-ruban

Concernant l'impédance de la transition, nous avons vu que, pour adapter l'impédance globale, il nous faudra varier le rapport n de la transition coaxiale. Le rapport n étant le rapport des diamètres de la transition coaxiale, il faut dans un premier temps fixer le diamètre de l'âme centrale de la transition. Nous savons que les contraintes technologiques nous imposent un diamètre minimum de $30 \mu\text{m}$ pour l'âme centrale de la transition coaxiale. C'est cette valeur qui sera retenue dans un premier temps pour nos études. Une variation de ce diamètre sera ensuite effectuée, afin de connaître les différences de performances électromagnétiques associées, si les contraintes technologiques imposaient une limite plus haute.

4.2.1 Variation du rapport n

Les dimensions retenues pour débiter cette étude sont illustrées Figure 4-6.

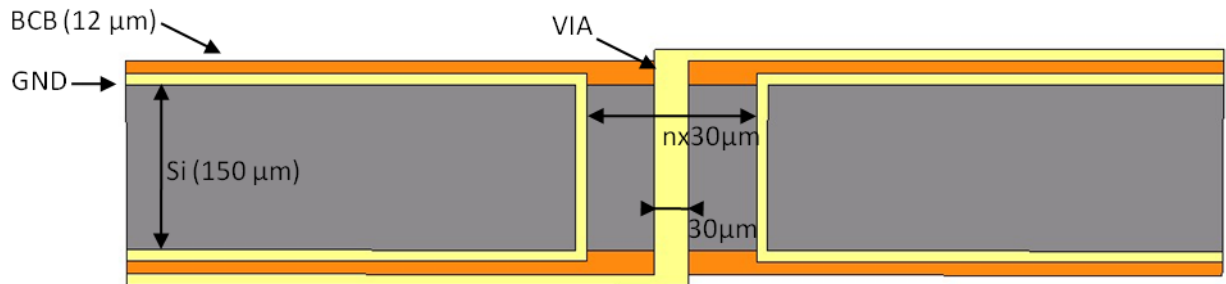


Figure 4-6 : Dimensions de la structure idéale

Les Figure 4-7 et

Figure 4-8 présentent les résultats de simulations électromagnétiques de cette structure, avec une variation du rapport n.

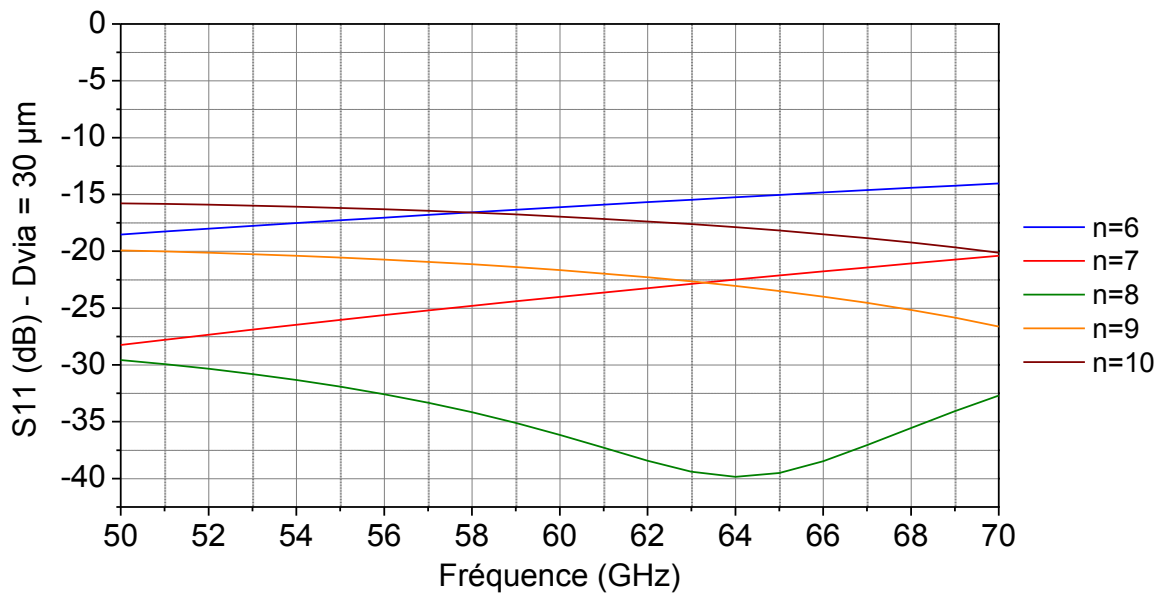


Figure 4-7 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition idéale avec $D_{via} = 30 \mu m$ et n variant de 6 à 10

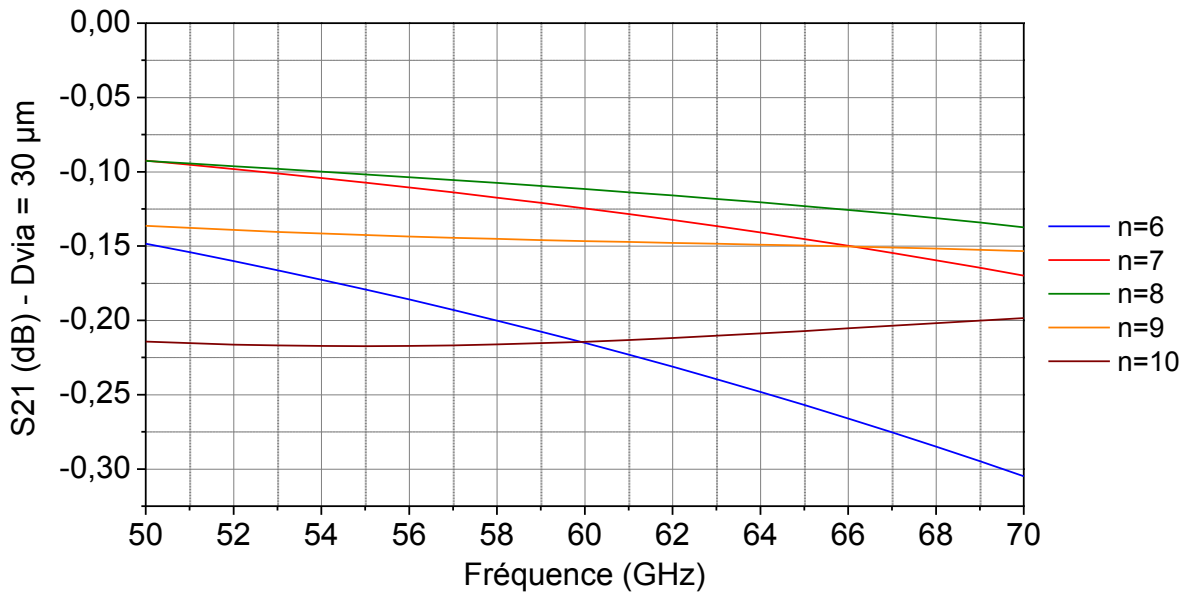


Figure 4-8 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition idéale avec $D_{via}=30 \mu\text{m}$ et n variant de 6 à 10

On note sur ces résultats de simulations que le rapport $n=8$ présente les meilleures performances. Le coefficient de réflexion se situe à -36 dB à 60 GHz et les pertes par transmission sont de $0,12 \text{ dB}$ à 60 GHz . L'encombrement de la transition coaxiale est de $34.10^3 \mu\text{m}^2$. Une transition coaxiale d'impédance caractéristique $Z_c=34 \Omega$ est donc la mieux adaptée.

Elle permet à l'ensemble rupture de géométrie/transition coaxiale/rupture de géométrie de présenter une impédance proche de 50Ω . Bien sûr cette valeur d'impédance n'est valable que pour une rupture de géométrie fixée. Tout changement de la géométrie, comme une modification du diamètre du via, de l'épaisseur du substrat, ou de la largeur de la ligne micro-ruban, entrainera une désadaptation différente et donc une impédance caractéristique optimale différente pour la transition coaxiale, comme illustré Figure 4-9.

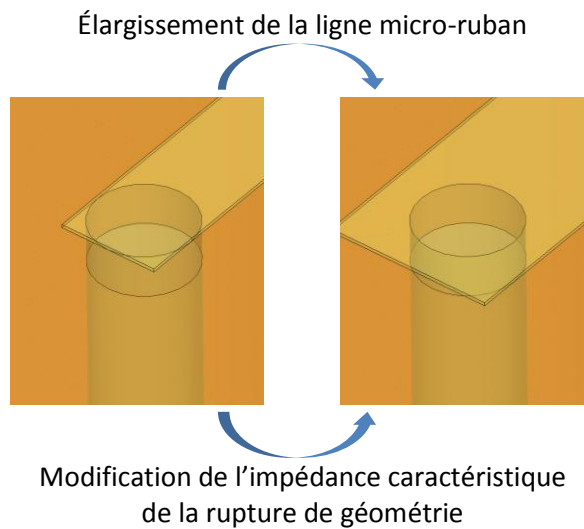


Figure 4-9 : Schéma de la modification de l'impédance caractéristique par la modification de la géométrie

4.2.2 Variation du diamètre du via

La valeur du diamètre du via connaît des limites imposées par les contraintes technologiques. Sa limite basse est fixée par la faisabilité de graver le BCB (structure finale) sur toute son épaisseur en gardant une gravure propre et anisotrope, ainsi que sur la faisabilité de remplir le via de métal après gravure. L'équation 2.4 présente ce rapport.

$$\text{Rapport d'aspect} = \frac{\text{profondeur du via}}{\text{diamètre du via}} \quad (2.4)$$

Pour une aisance de réalisation technologique, nous avons choisi de fixer le rapport d'aspect maximal à une valeur de 5. Il est ainsi tout à fait possible de réaliser la gravure du BCB. L'épaisseur du substrat étant de 150 μm , ce rapport d'aspect de 5 fixe donc un diamètre minimal du via de 30 μm .

Nous avons donc fait varier le diamètre du via de 30 μm à 75 μm , c'est-à-dire d'un rapport d'aspect de 5 à 2. Le tableau suivant présente les différents cas étudiés.

Rapport d'aspect	Diamètre du via
5	30 μm
4	37,5 μm
3	50 μm
2	75 μm

Tableau 4-3 : différents cas étudiés selon la variation du diamètre des vias

A noter que le diamètre du via excède la largeur de la ligne micro-ruban. Il est donc nécessaire de réaliser un élargissement de la ligne, nommé taper. Il existe plusieurs types de taper dans la littérature. Le taper que nous utilisons est un élargissement à 45° de la ligne micro-ruban vers l'âme centrale du coaxial. La Figure 4-10 schématise ce taper.

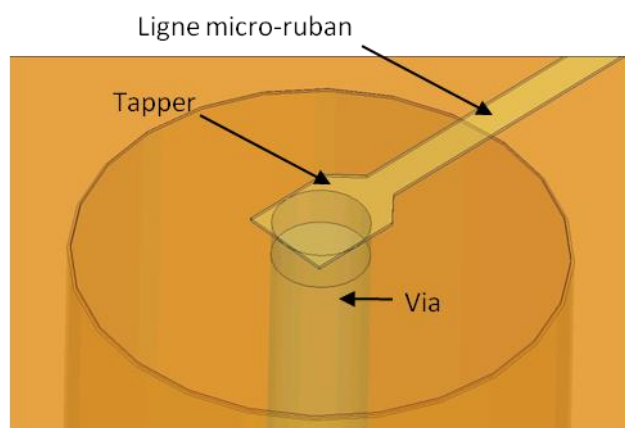


Figure 4-10 : Schéma du taper

Cet élargissement crée une désadaptation d'impédance progressive de la ligne micro-ruban, ce qui réduit le phénomène de réflexion.

Comme présenté précédemment, chaque diamètre de via, pour une largeur de ligne micro-ruban fixe, possède un rapport n optimal pour les performances électromagnétiques de la structure. Les

Figure 4-11 à

Figure 4-16 présentent les résultats de simulations des coefficients de réflexion et de transmission selon une variation du rapport n , et ce pour chaque rapport d'aspect étudié.

Rapport d'aspect=4, Dvia = 37,5 μm

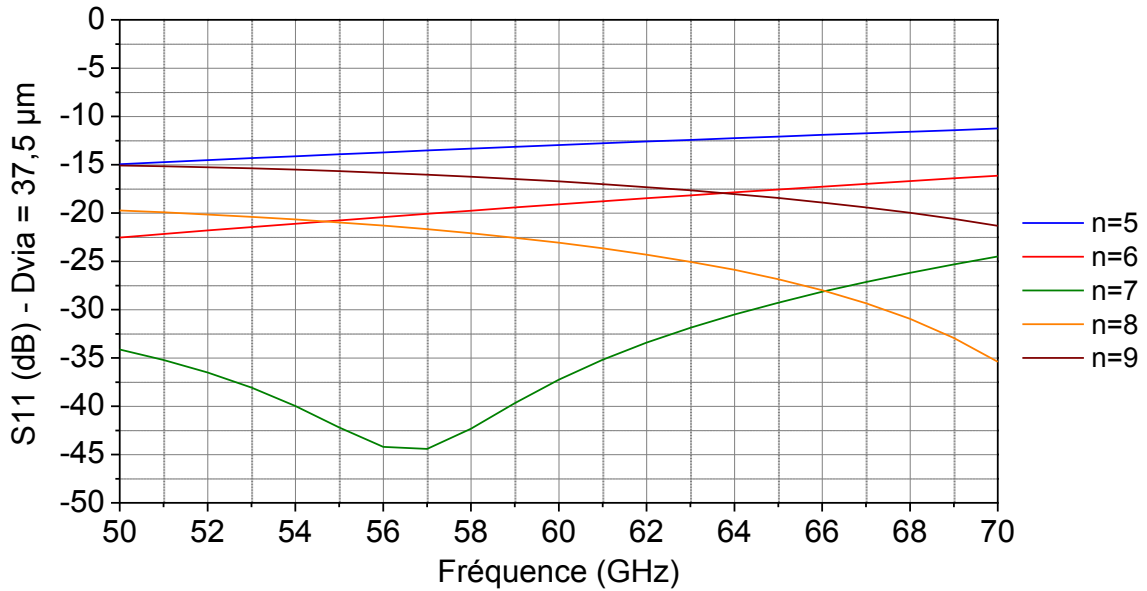


Figure 4-11 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition idéale avec $D_{via}=37,5 \mu\text{m}$ et n variant de 5 à 9

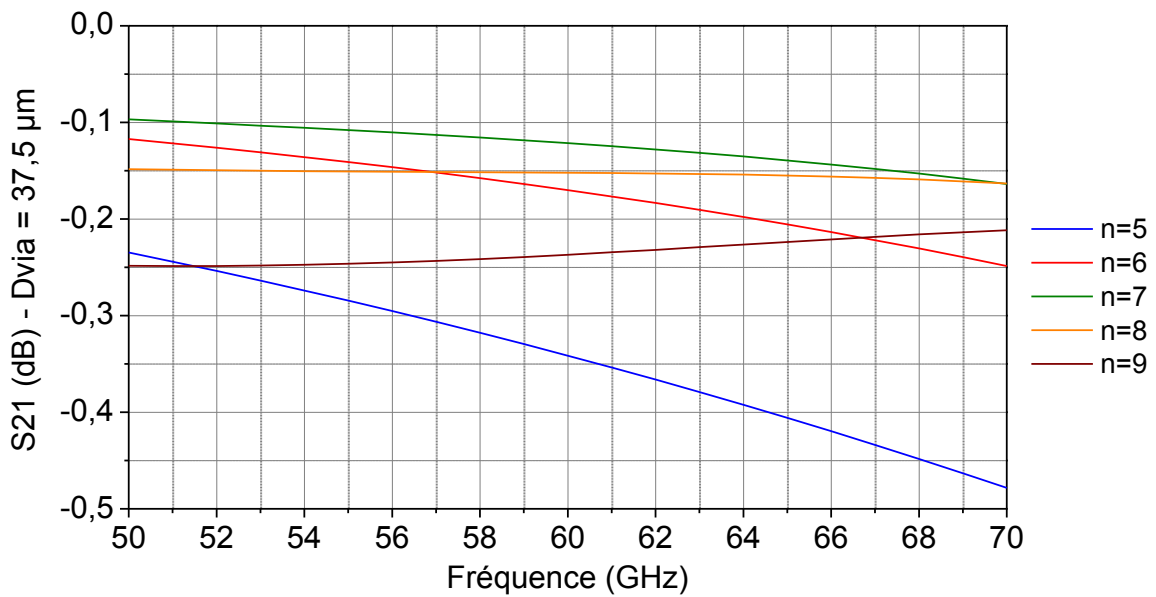


Figure 4-12 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition idéale avec $D_{via}=37,5 \mu\text{m}$ et n variant de 5 à 9

On note que pour un diamètre de via de 37,5 μm , comme pour le cas d'un diamètre de via de 30 μm , le rapport n optimal en termes de performances électromagnétiques est égal à 7, avec un coefficient de transmission de -0,12 dB à 60 GHz, et un coefficient de réflexion de -38 dB. Ce rapport correspond à une impédance caractéristique de la transition de 34 Ω . Dans ce cas, l'encombrement de la transition coaxiale est de $54.10^3 \mu\text{m}^2$.

Rapport d'aspect=3, Dvia = 50 μm

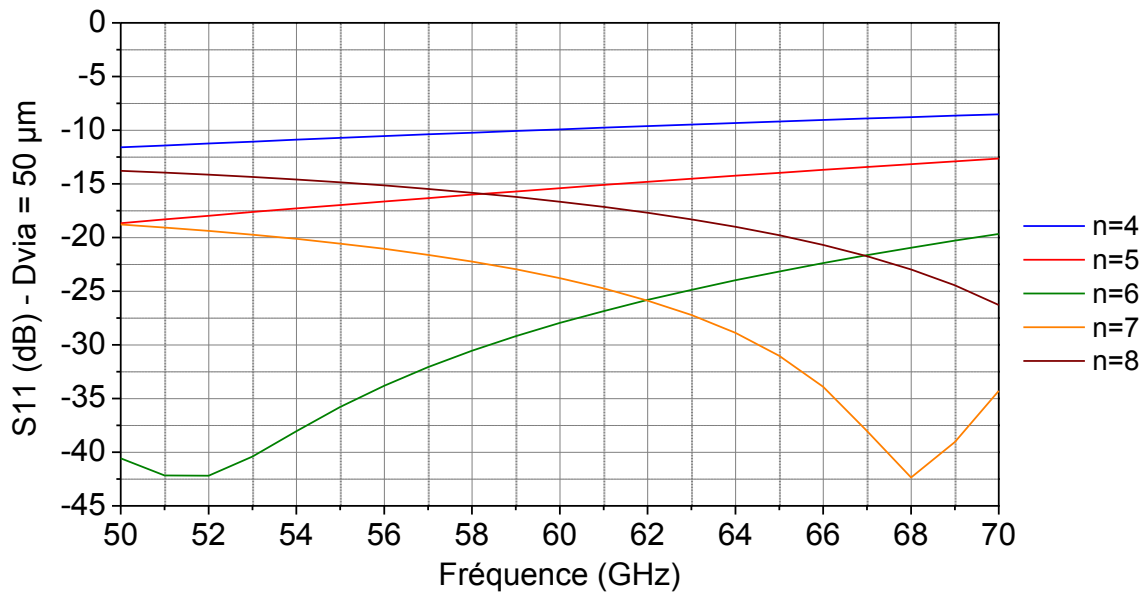


Figure 4-13 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition idéale avec $D_{\text{via}}=50 \mu\text{m}$ et n variant de 4 à 8

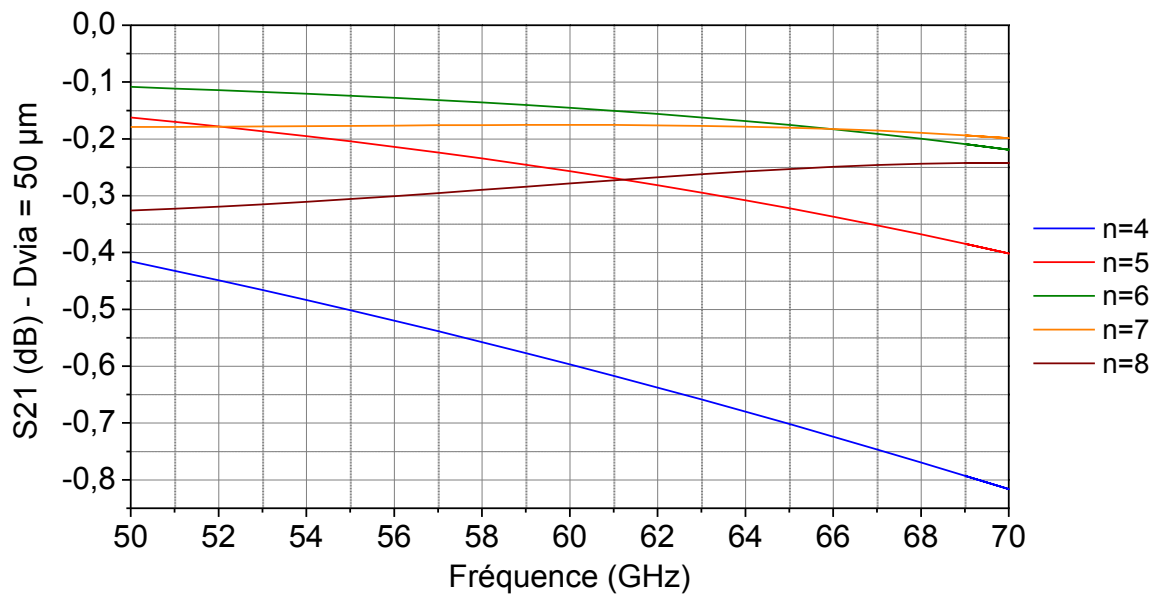


Figure 4-14 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition idéale avec $D_{\text{via}}=50 \mu\text{m}$ et n variant de 4 à 8

On note que pour un diamètre de via de $50 \mu\text{m}$, le rapport n optimal en termes de performances électromagnétiques est égal à 6, avec un coefficient de transmission de $-0,15 \text{ dB}$ à 60 GHz , et un coefficient de réflexion de -28 dB . Ce rapport d'aspect correspond à une impédance caractéristique de la transition de 31Ω . L'encombrement de la transition coaxiale est alors de $71.10^3 \mu\text{m}^2$.

Rapport d'aspect=2, $D_{\text{via}} = 75 \mu\text{m}$

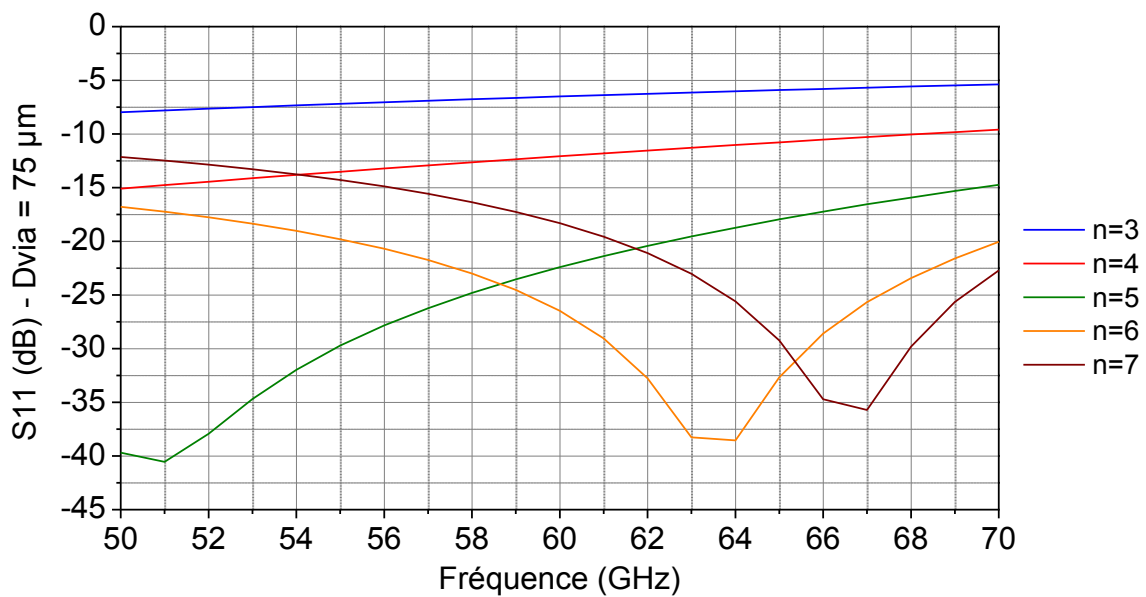


Figure 4-15 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition idéale avec $D_{\text{via}}=75 \mu\text{m}$ et n variant de 3 à 7

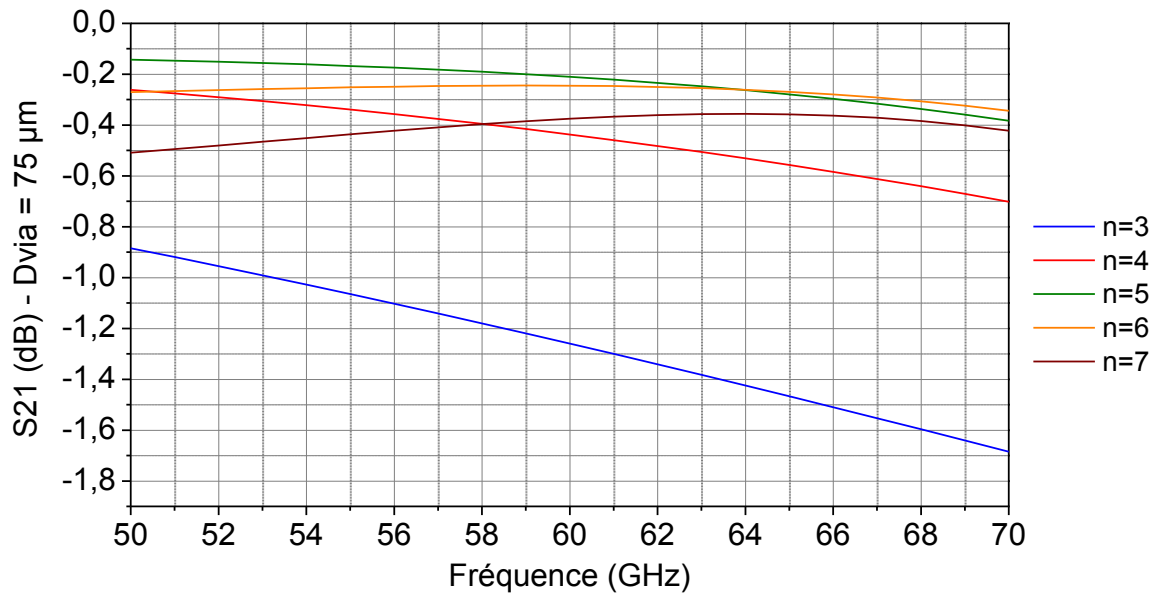


Figure 4-16 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition idéale avec $D_{\text{via}}=75 \mu\text{m}$ et n variant de 3 à 7

On note que pour un diamètre de via de $75 \mu\text{m}$, le rapport n optimal est égal à 5, avec un coefficient de transmission de $-0,15 \text{ dB}$ à 60 GHz , et un coefficient de réflexion de -28 dB . Ce rapport d'aspect correspond à une impédance caractéristique de la transition de 28Ω . L'encombrement de la transition coaxiale est alors de $110.10^3 \mu\text{m}^2$.

Le Tableau 4-4 présente le rapport n optimal correspondant à chaque rapport d'aspect étudié.

Diamètre du via	Rapport d'aspect	Rapport n optimal	Impédance caractéristique	Encombrement
$30 \mu\text{m}$	5	8	34Ω	$45.10^3 \mu\text{m}^2$
$37,5 \mu\text{m}$	4	7	34Ω	$54.10^3 \mu\text{m}^2$
$50 \mu\text{m}$	3	6	31Ω	$71.10^3 \mu\text{m}^2$
$75 \mu\text{m}$	2	5	28Ω	$110.10^3 \mu\text{m}^2$

Tableau 4-4 : Rapport n optimal correspondant à chaque rapport d'aspect étudié

Les Figure 4-17 et Figure 4-18 présentent les comparaisons de chaque cas optimal, c'est-à-dire une comparaison selon les diamètres de vias étudiés, associés au rapport n optimal.

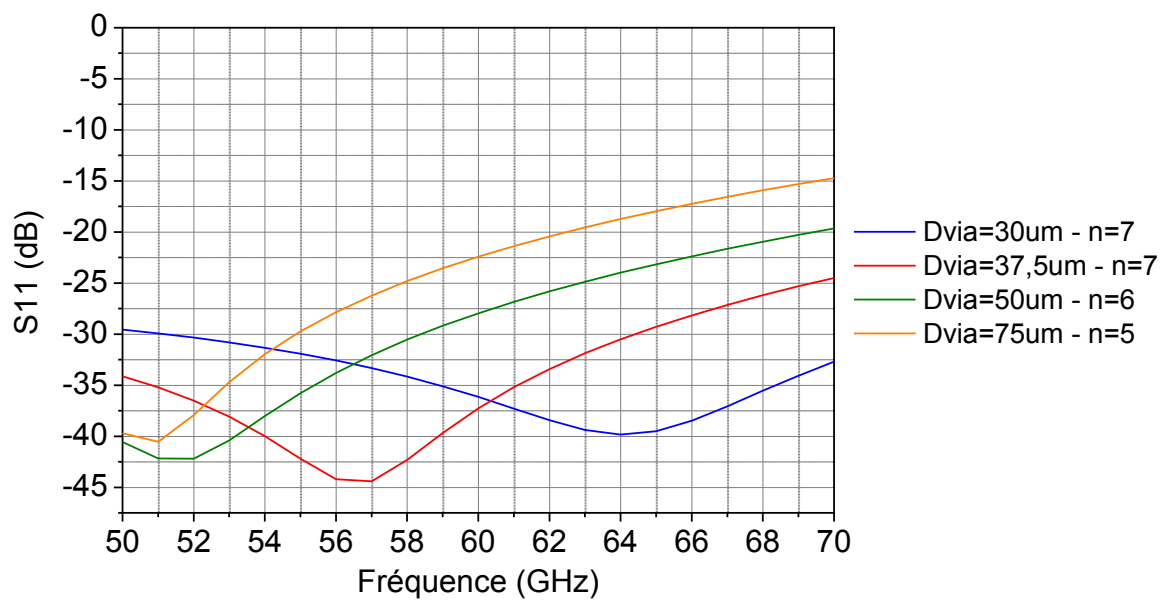


Figure 4-17 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de chaque cas optimal

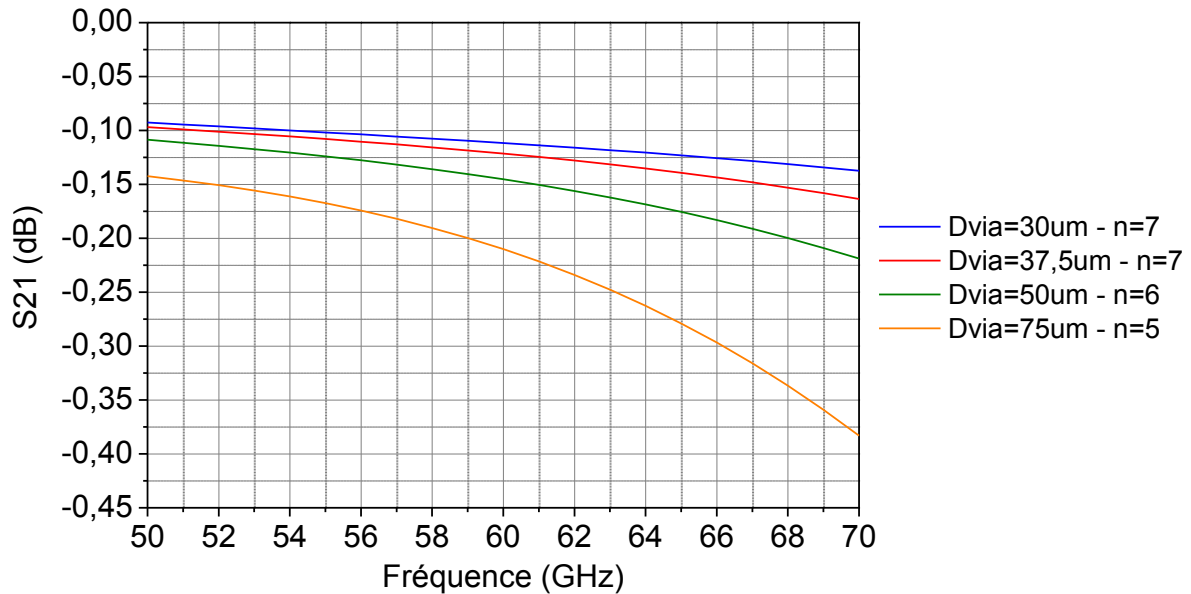


Figure 4-18 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de chaque cas optimal

On note qu'un diamètre de via plus petit entraîne de meilleures performances électromagnétiques, tant au niveau de la transmission que de la réflexion du signal. Ceci s'explique dans un premier temps par le fait qu'un diamètre de via de 30 μm permet de se dispenser de la structure de taper. La désadaptation d'impédance est donc moindre. Mais sur la Figure 4-18, il apparaît clairement que ce n'est pas le seul phénomène impliqué. En effet la différence entre les coefficients de transmission est minime entre les diamètres de via de 30 et 37,5 μm , alors qu'elle prend de l'ampleur avec les diamètres plus élevés. Modifier le diamètre de l'âme centrale de la transition coaxiale augmente la surface du disque de "section", ce qui nécessite la mise en place du taper. L'augmentation du diamètre augmente donc la surface du taper. Or ce taper rayonne, de la même manière qu'une antenne planaire. Une partie de l'énergie est donc rayonnée au niveau du taper. Le rayonnement augmente lorsque la surface du taper augmente, ce qui explique les différences observées en termes de performances électromagnétiques.

La structure que nous avons étudiée utilise le silicium comme diélectrique dans la transition coaxiale, avec un plan de masse continu. Elle n'est pas réalisable technologiquement, mais permet d'obtenir des résultats électromagnétiques de référence. Nous présentons dans les paragraphes suivants l'étude de structures réalisables technologiquement, en essayant de nous approcher au mieux de la structure de référence que nous avons étudiée jusque là.

5 MODIFICATION DE LA STRUCTURE - CAS REALISABLE

5.1 Utilisation de vias de masse - 4 Vias

Pour se replacer dans un cas réalisable, le plan de masse continu de la transition coaxiale est remplacé par des vias qui, s'ils sont placés assez proches les uns des autres, créent une masse électromagnétique quasi continue.

Tout d'abord le plan de masse est remplacé par quatre vias, placés à 90° les uns des autres autour de l'âme centrale. Le diamètre des vias de masse est le même que celui de l'âme centrale.

L'étude reprend les meilleurs cas présentés précédemment pour les différents rapports d'aspect. Les vias de masse sont placés de façon à ce que l'extrémité du cylindre corresponde à l'emplacement du plan de masse. La Figure 5-1 présente la structure.

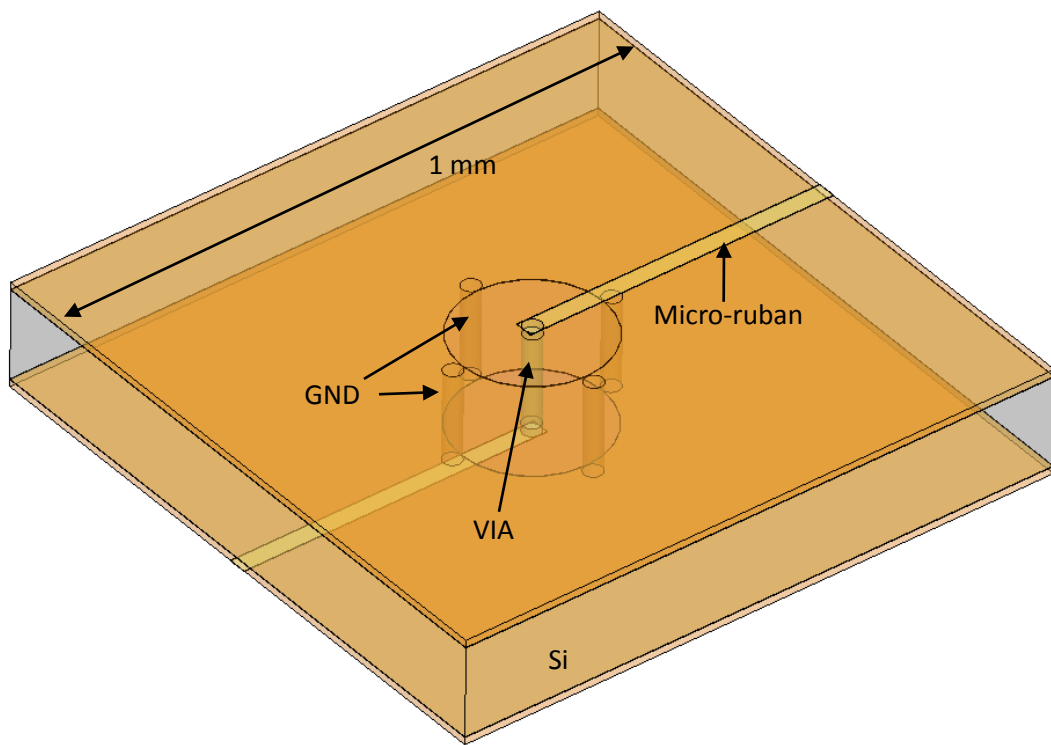


Figure 5-1 : structure utilisant quatre vias de masse

La Figure 5-2 situe les vias de masse par rapport au plan de masse circulaire précédemment utilisé.

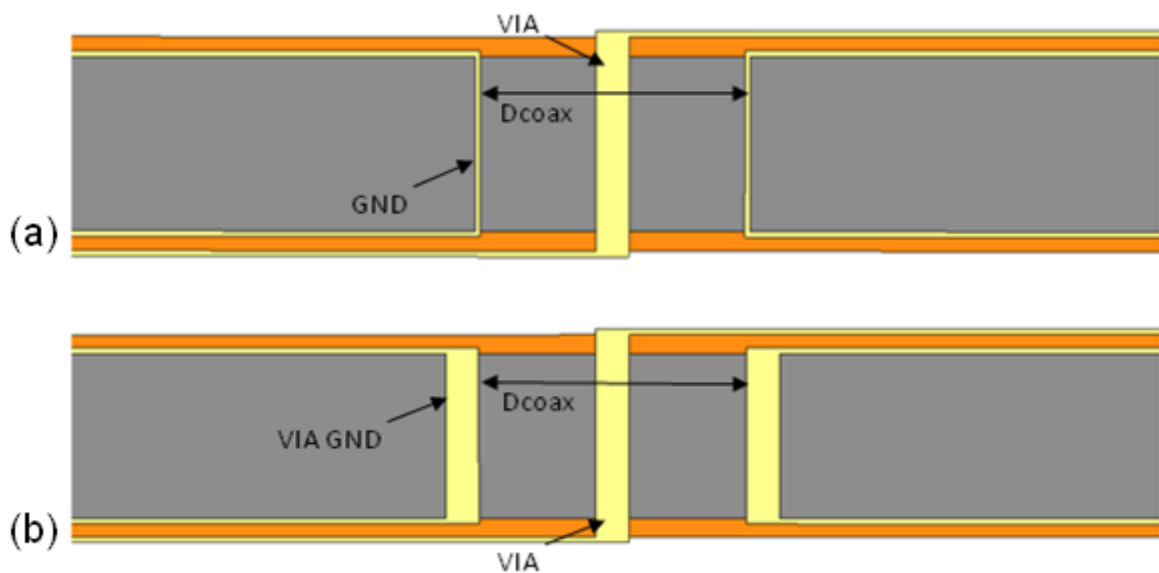


Figure 5-2 : Comparaison des structures (a) avec plan de masse continu et (b) avec vias de masse

Nous pouvons observer sur cette figure que le diamètre du modèle coaxial reste identique. Au niveau électromagnétique, les différences entre ce cas et le cas idéal vont se créer à partir de la non-uniformité du plan de masse circulaire et donc, d'une part, de la répartition non-uniforme des lignes de champs à l'intérieur de la structure coaxiale et d'autre part, de la transition discontinue du plan de masse de la ligne micro ruban vers la transition coaxiale.

A noter que pour l'encombrement surfacique de la structure, il est nécessaire d'ajouter au rapport précédent la surface occupée par les vias de masse. Dans ce cas, l'encombrement surfacique est défini par l'équation 2.5 :

$$E = \pi \times \left(\frac{D_{coax}}{2} + D_{via} \right)^2 \quad (2.5)$$

Pour un diamètre de via de 30 μm , les meilleures performances se situent toujours pour un rapport n de 7, avec un coefficient de réflexion de -36 dB et un coefficient de transmission de -0,12 dB à 60 GHz. Un rapport n de 7 signifie un diamètre de transition coaxiale de 270 μm .

Les Figure 5-3 et Figure 5-4 présentent, pour un diamètre de via de 30 μm , et un rapport n=7 idéal dans les deux cas, une comparaison des paramètres S simulés entre la structure idéale avec plan de masse plein et la structure avec plan de masse modélisé par quatre vias de masse.

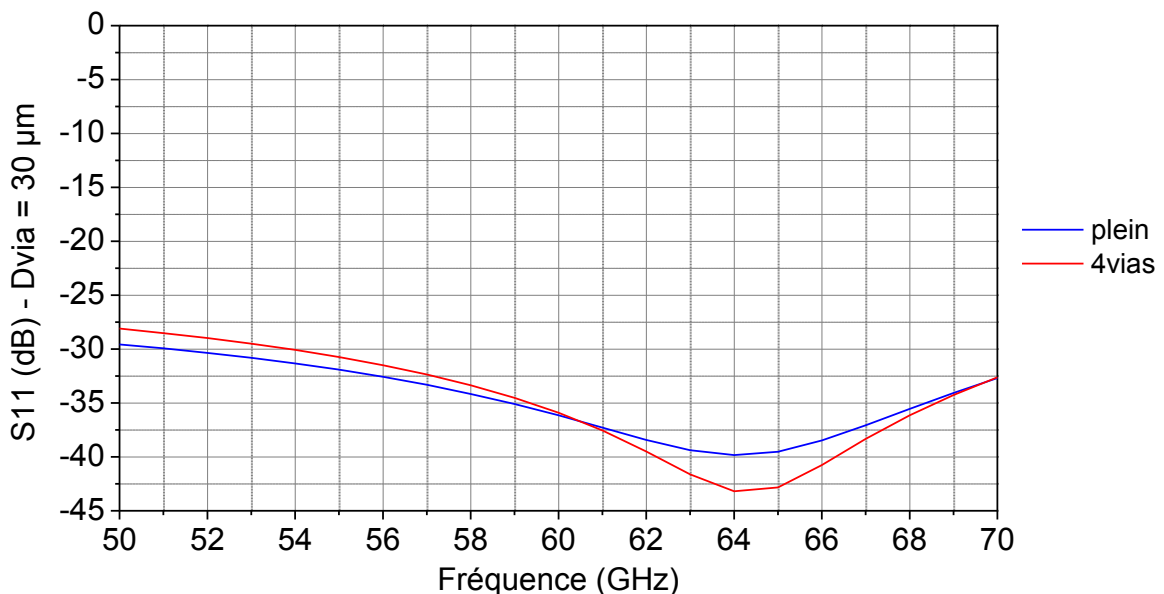


Figure 5-3 : Comparaison du coefficient de réflexion (S_{11}) pour une structure à plan de masse continu (plein) et une structure à plan de masse à quatre vias et un rapport n=7

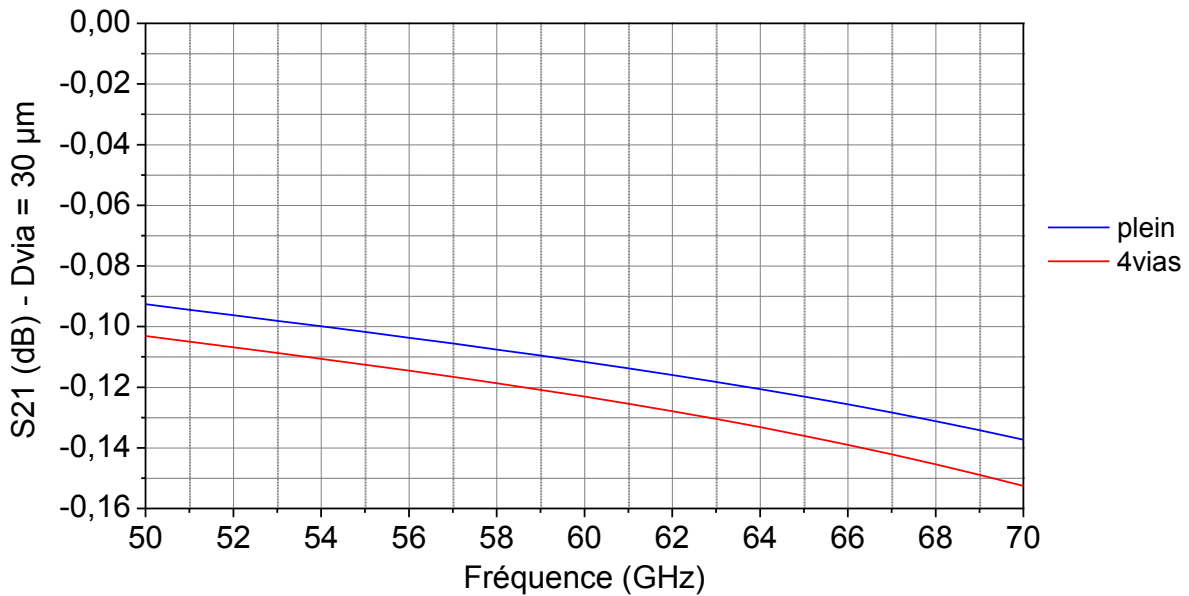


Figure 5-4 : Comparaison du coefficient de transmission (S_{21}) pour une structure à plan de masse continu (plein) et une structure à plan de masse à quatre vias et un rapport $n=7$

On note que pour le coefficient de transmission, la structure utilisant les quatre vias pour le plan de masse subit une légère dégradation, de l'ordre de 0,02 dB, sur la bande de fréquence 50 à 70 GHz. Le coefficient de réflexion quant à lui reste quasiment identique, bien en deçà de la barre des -25 dB sur cette même bande de fréquences.

Malgré une légère perte supplémentaire en transmission, la structure à quatre vias présente des résultats similaires à la structure idéale sur silicium. Le paragraphe suivant montre une évolution de la structure permettant de dépasser ces performances électromagnétiques.

5.2 Utilisation de vias de masse – 8 Vias

Pour améliorer l'uniformité de la répartition des lignes de champs au sein de la transition, le plan de masse de la transition coaxiale modélisé par quatre vias est renforcé par huit vias qui, s'ils sont placés assez proches les uns des autres, créeront une masse électromagnétique quasi continue.

Comme précédemment, le diamètre des vias de masse est le même que celui de l'âme centrale, la limite basse du diamètre étant fixée par les contraintes de réalisation technologique.

Comme précédemment les vias de masse sont placés de façon à ce que l'extrémité du cylindre corresponde à l'emplacement du plan de masse. La Figure 5-5 présente la structure.

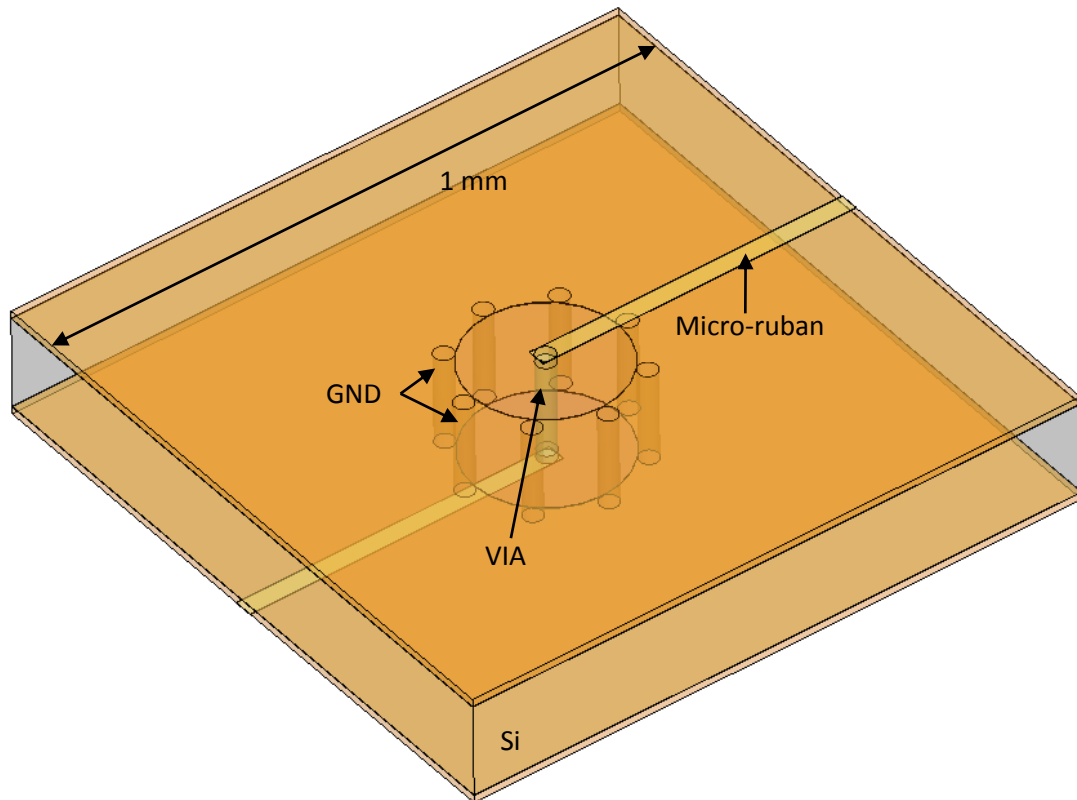


Figure 5-5 : structure utilisant huit vias de masse

Pour un diamètre de via de $30\ \mu\text{m}$, les meilleures performances se situent toujours pour un rapport n de 7, avec un coefficient de réflexion de $-34\ \text{dB}$ et un coefficient de transmission de $-0,11\ \text{dB}$ à $60\ \text{GHz}$. Un rapport n de 7 signifie un diamètre de transition coaxiale de $270\ \mu\text{m}$.

Les Figure 5-6 et Figure 5-7 présentent, pour un diamètre de via de $30\ \mu\text{m}$, et un rapport $n=7$, une comparaison des paramètres S simulés entre structure idéale avec plan de masse plein, structure avec plan de masse modélisé par quatre vias et structure avec plan de masse modélisé par huit vias.

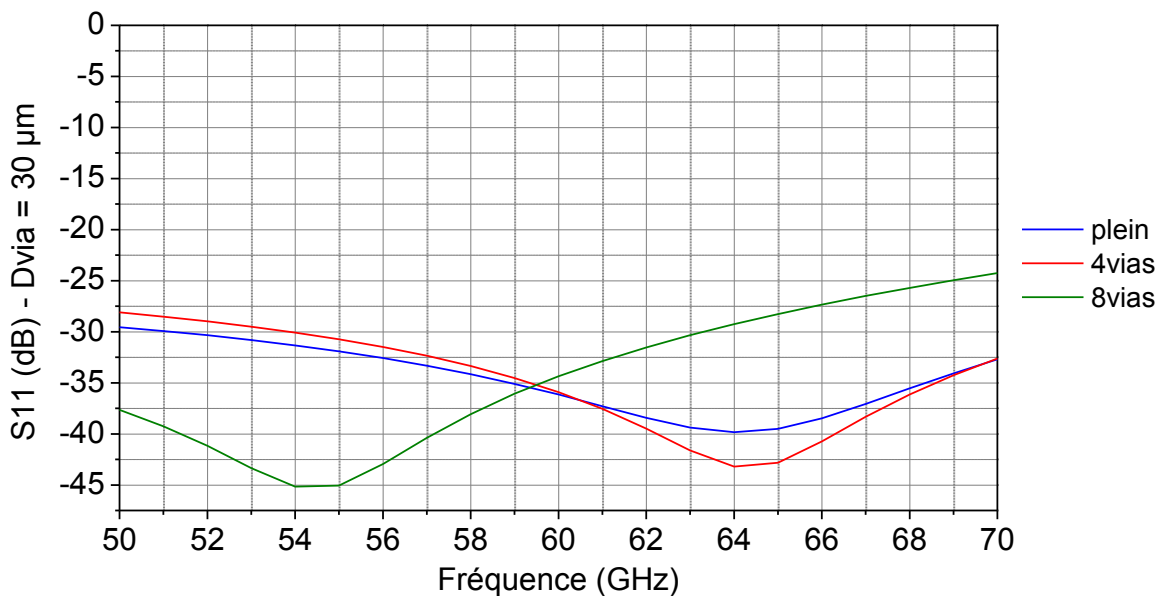


Figure 5-6 : Comparaison du coefficient de réflexion (S_{11}) pour une structure à plan de masse continu (plein), une structure à plan de masse à quatre vias et une structure à plan de masse à 8 vias

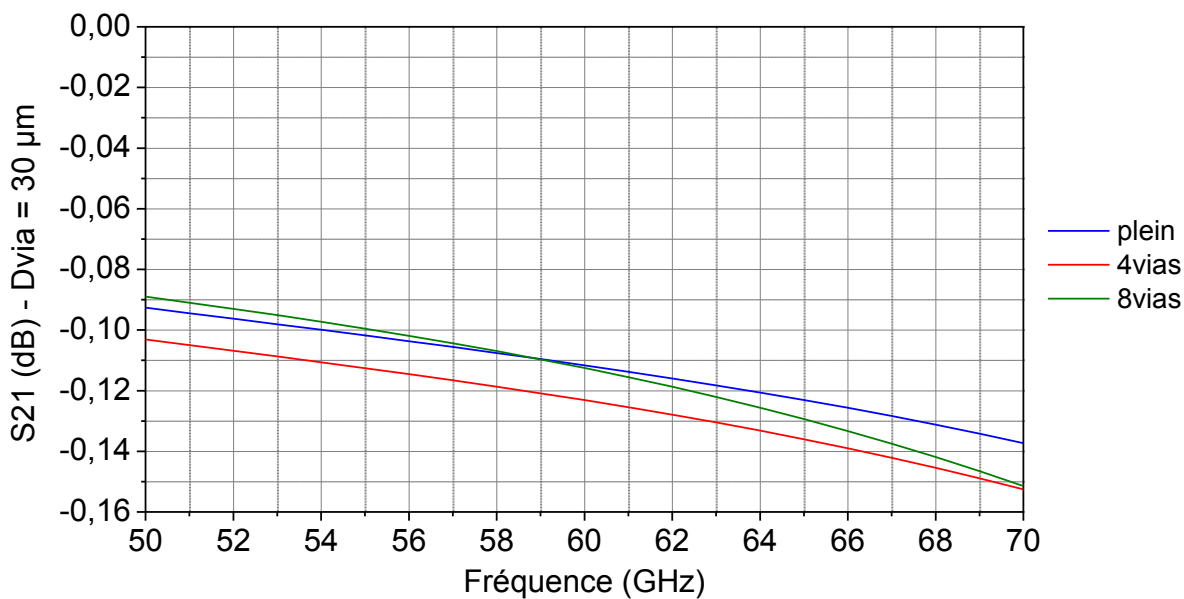


Figure 5-7 : Comparaison du coefficient de transmission (S_{21}) pour une structure à plan de masse continu (plein), une structure à plan de masse à 4 vias et une structure à plan de masse à 8 vias

On note que pour le coefficient de transmission, la structure utilisant les huit vias pour le plan de masse présente une meilleure performance que la structure à quatre vias, quasiment équivalente à la structure à plan de masse continu. Le paramètre de réflexion S_{11} , quant à lui, subit un décalage sur la fréquence de résonance, mais reste toujours sous la barre des -25 dB.

Le Tableau 5-1 résume les performances des différentes structures étudiées, pour un diamètre d'âme centrale de 30 μm .

	Coaxial Silicium	Structure 4 vias	Structure 8 vias
S11 @ 60 GHz (dB)	-36	-36	-34
S21 @ 60 GHz (dB)	-0,12	-0,12	-0,11
Rapport n	7	7	7
Encombrement surfacique E (μm^2)	34.10^3	57.10^3	57.10^3

Tableau 5-1 : Résumé des performances des différentes structures étudiées

On note que les trois structures présentent des performances électromagnétiques similaires. L'encombrement surfacique de $57.10^3 \mu\text{m}^2$ est lié à l'utilisation des vias de masse pour la transition coaxiale.

5.3 Conclusion partielle / transition

Les performances électromagnétiques présentées par cette structure sont tout à fait utilisables pour notre application.

Nous avons vu plus haut que les performances électromagnétiques de la structure ne sont pas les seuls paramètres à prendre en compte. La haute densité d'intégration visée pour l'utilisation de nos structures implique un écartement très réduit entre transitions verticales voisines. Il est donc nécessaire d'étudier l'isolation de nos structures.

De plus, ces transitions ont été développées sur substrats de silicium haute résistivité. Ces substrats coûtent plus cher que les substrats basse résistivité. Comme ordre d'idée, un devis a été fait chez Si-Mat, pour une commande de 25 substrats de silicium haute résistivité et 25 substrats basse résistivité. Il montre que la version haute résistivité coûte plus de 70% plus cher que celle à résistivité classique. Il est donc nécessaire d'optimiser la transition pour qu'elle soit utilisable sur un substrat de silicium basse résistivité, et réponde ainsi au critère faible coût des nombreuses applications grand public, ainsi qu'à l'un des objectifs majeurs du projet SIPCOM.

Enfin, bien qu'il soit déjà relativement réduit, il est également important d'optimiser l'encombrement de la transition verticale. Ainsi la limite technologique pour la densité d'intégration ne sera pas imposée par l'encombrement des transitions verticales.

Pour réduire l'encombrement, il faut agir sur les paramètres le définissant. Les équations ci dessous, dont certaines présentées précédemment sont rappelées, illustrent la démarche.

$$E = \pi \times \left(\frac{D_{coax}}{2} \right)^2 \quad (2.6)$$

et

$$n = \frac{\text{diamètre du coaxial}}{\text{diamètre du via}} = \frac{D_{coax}}{D_{via}} \quad (2.7)$$

Donc

$$D_{coax} = n \times D_{via} \quad (2.8)$$

De plus

$$Z_c = \frac{60 \times \ln(n)}{\sqrt{\epsilon r}} \quad (2.9)$$

D'où

$$n = e^{\frac{(Z_c \times \sqrt{\epsilon r})}{60}} \quad (2.10)$$

Donc

$$E = \pi \times \left(\frac{n \times D_{via}}{2} \right)^2 \quad (2.11)$$

D'où

$$E = \pi \times \left(\frac{e^{\frac{(Z_c \times \sqrt{\epsilon r})}{60}} \times D_{via}}{2} \right)^2 \quad (2.12)$$

L'encombrement de la structure est défini comme ceci :

Il est défini en fonction du diamètre de la transition coaxiale

Ce diamètre est fixé en fonction du rapport n par rapport au diamètre de l'âme centrale du coaxial.

D'une part le diamètre de l'âme centrale est limité par les conditions de réalisation technologique.

D'autre part le rapport n est une fonction de :

- l'impédance caractéristique, qui est fixée pour optimiser les performances électromagnétiques de la transition,
- de la permittivité relative du diélectrique dans la transition coaxiale, notée ϵ_r .
- Cette permittivité relative est propre au matériau utilisé comme diélectrique.

Le moyen de diminuer l'encombrement de la structure est donc de diminuer cette permittivité relative. Pour cela il est nécessaire d'utiliser un matériau à permittivité relative plus faible dans la transition coaxiale.

6 ETUDE SUR SUBSTRAT BASSE RESISTIVITE

Pour connaître les performances de la transition sur substrat de silicium basse résistivité, nous avons modifié les paramètres du substrat dans les simulations et effectué une étude comparative. Les nouveaux paramètres du silicium utilisé sont donnés dans le Tableau 6-1. Seule la conductivité volumique a changé. Elle correspond à une résistivité de $10 \Omega \cdot \text{cm}$. Nous n'avons pas modifié la tangente de pertes diélectriques, ne connaissant pas celle du silicium basse résistivité.

	Silicium
Permittivité relative	11,7
Conductivité volumique (S/m)	10
Tangente de pertes diélectriques	0,015

Tableau 6-1 : Propriétés du silicium basse résistivité

Les Figure 6-1 et Figure 6-2 présentent une comparaison des résultats de simulations de notre structure pour les deux types de silicium utilisés.

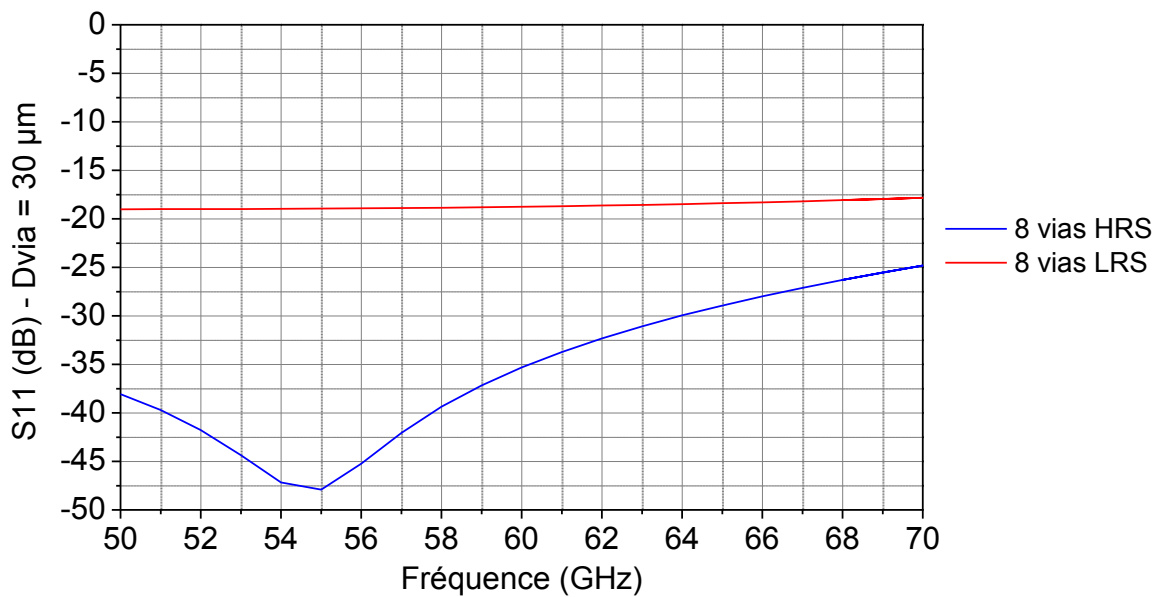


Figure 6-1 : Comparaison du coefficient de réflexion (S_{11}) pour une structure sur substrat silicium basse résistivité (LRS) et une structure sur substrat silicium haute résistivité (HRS)

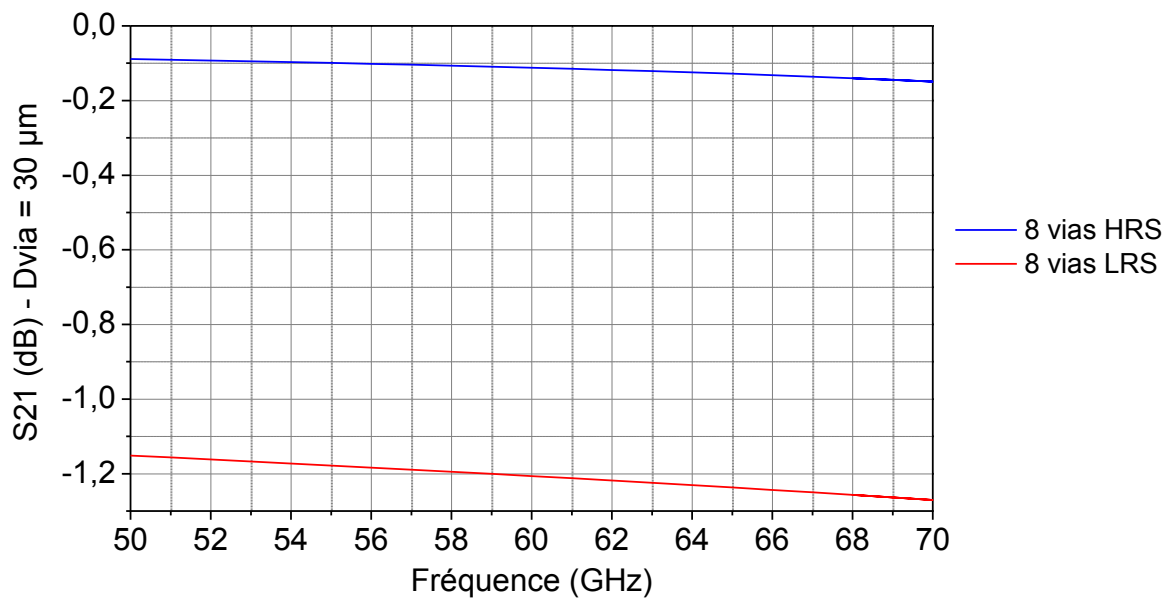


Figure 6-2 : Comparaison du coefficient de transmission (S_{21}) pour une structure sur substrat silicium basse résistivité (LRS) et une structure sur substrat silicium haute résistivité (HRS)

Les résultats de simulations montrent une très nette dégradation des performances électromagnétiques de la structure 8 vias avec le substrat LRS. A noter que le rapport n optimal a été réétudié et qu'il reste le même dans les deux cas, c'est-à-dire égal à 7. Le coefficient de réflexion subit une hausse non négligeable et reste aux alentours des -18 dB sur

toute la bande 50 - 70 GHz. Pour le coefficient de transmission, des pertes supplémentaires d'environ 1,1 dB s'ajoutent sur toute cette bande de fréquences, donnant un coefficient de transmission de -1,22 dB à 60 GHz.

Ces résultats affichent des pertes électromagnétiques non négligeables lors du passage du signal dans la transition coaxiale, la rendant de ce fait beaucoup moins intéressante pour un substrat de silicium basse résistivité.

7 ETUDE DU COUPLAGE EM

Comme nous l'avons vu précédemment, le projet SIPCOM visant à créer un module d'intégration 3D à très haute densité d'intégration, il est nécessaire de minimiser le rayonnement électromagnétique parasite émis par chaque composant. Sans cette limite, l'information se propageant sur un conducteur peut par rayonnement électromagnétique parasiter fortement les signaux des conducteurs voisins.

Le plan de masse de cette transition coaxiale est créé par des vias, placés suffisamment proches les uns de autres pour créer une "barrière" électromagnétique et simuler un plan de masse quasi continu. Malgré tout, cette barrière n'est pas parfaite. Lors de la propagation du signal dans la transition coaxiale, une partie de l'énergie est rayonnée dans le substrat, ce qui peut polluer les structures voisines du point de vue électromagnétique. Nous avons réalisé quelques simulations pour étudier ce phénomène.

Dans un premier temps la Figure 7-1 présente une vue en coupe d'une transition seule, prise au milieu de l'épaisseur du substrat.

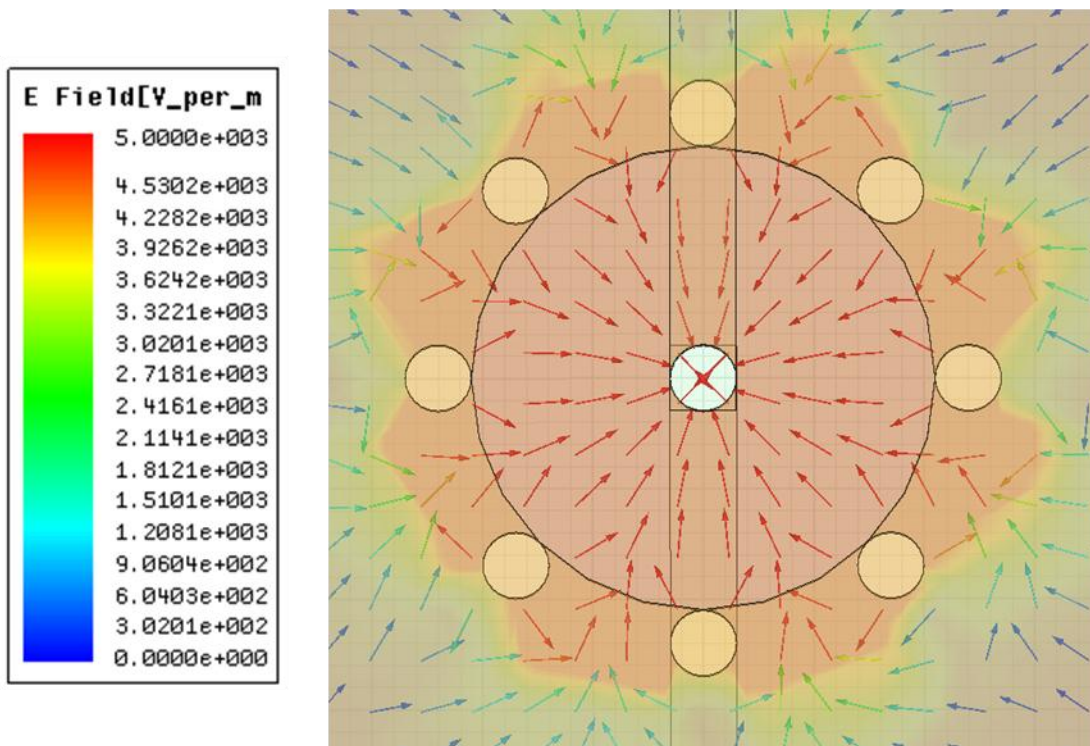


Figure 7-1 : Carte du champ électrique et des lignes de champs électriques dans la structure

Nous représentons sur cette figure les lignes du champ E. Nous pouvons observer un rayonnement du champ E dans le substrat, au delà des vias de masses, ce qui traduit un couplage possible entre transitions voisines.

Les simulations suivantes vont permettre de donner une valeur au couplage entre structures voisines, selon la distance qui les sépare (pour cela deux transitions coaxiales sont juxtaposées afin de quantifier les échanges entre les entrées de chaque transition). La Figure 7-2 présente la structure globale étudiée.

Nous avons défini l'espacement comme la distance séparant les deux vias de masse les plus proches. Les résultats de simulations électromagnétiques sont présentés Figure 7-3 et Figure 7-4, pour une variation de l'espacement de 5 à 100 μm .

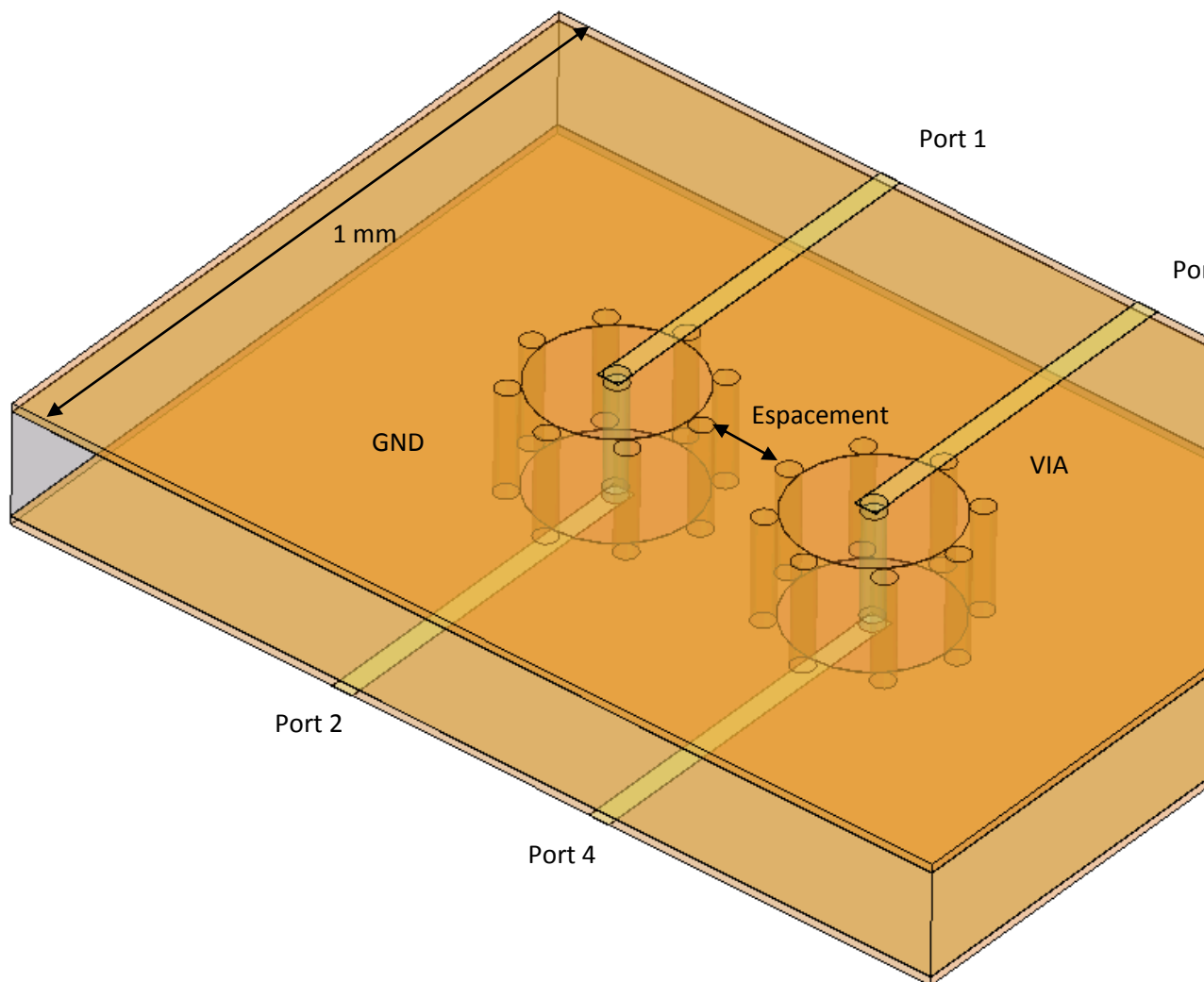


Figure 7-2 : Structure développée pour l'étude du couplage électromagnétique

Les résultats de transmission entre les ports 1 et 4 et 1 et 3 nous permettent de visualiser le couplage entre les transitions. A ce couplage des transitions s'ajoute le couplage entre les lignes micro-rubans. Il est donc nécessaire de "soustraire" ce couplage du résultat complet pour ne quantifier que la partie qui nous intéresse. Néanmoins, on décèle déjà un couplage non négligeable entre les structures autour de -50 dB, comme illustré Figure 7-4.

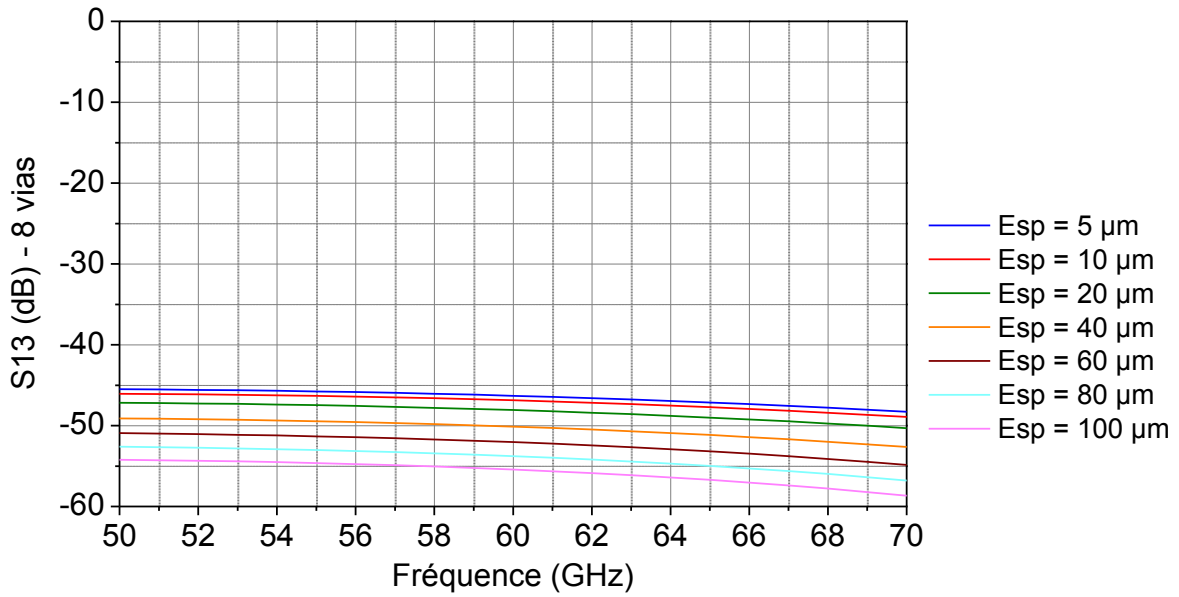


Figure 7-3 : Coefficient de transmission (S_{13}) entre les deux structures pour différents espacements

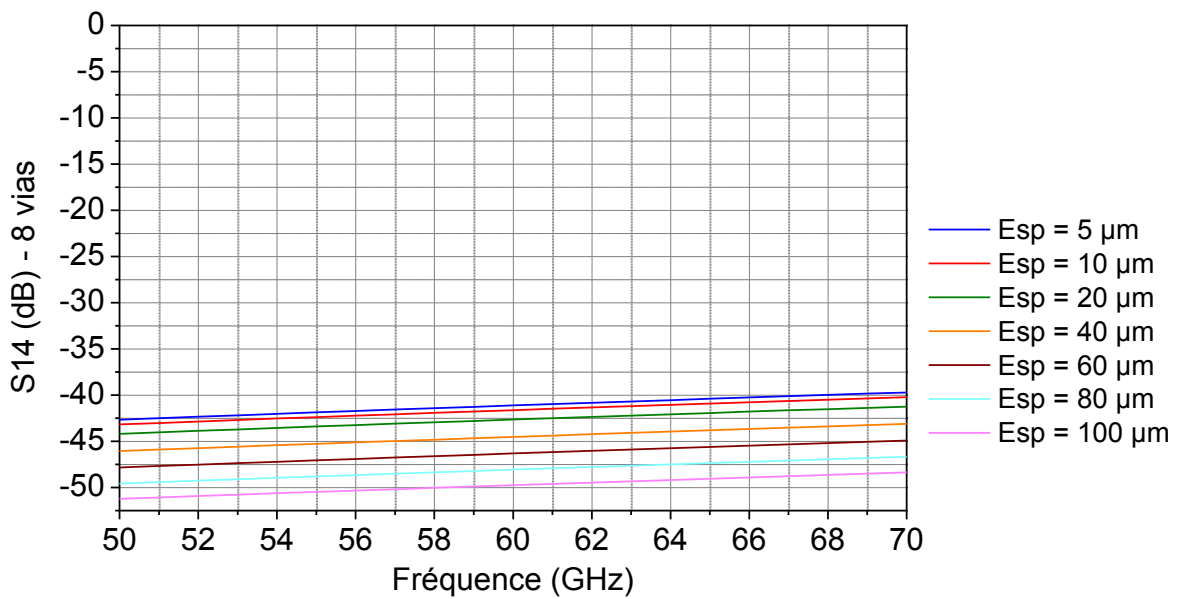


Figure 7-4 : Coefficient de transmission (S_{14}) entre les deux structures pour différents espacements

La Figure 7-5 présente la structure simulée pour obtenir les résultats de couplage entre les lignes micro-rubans.

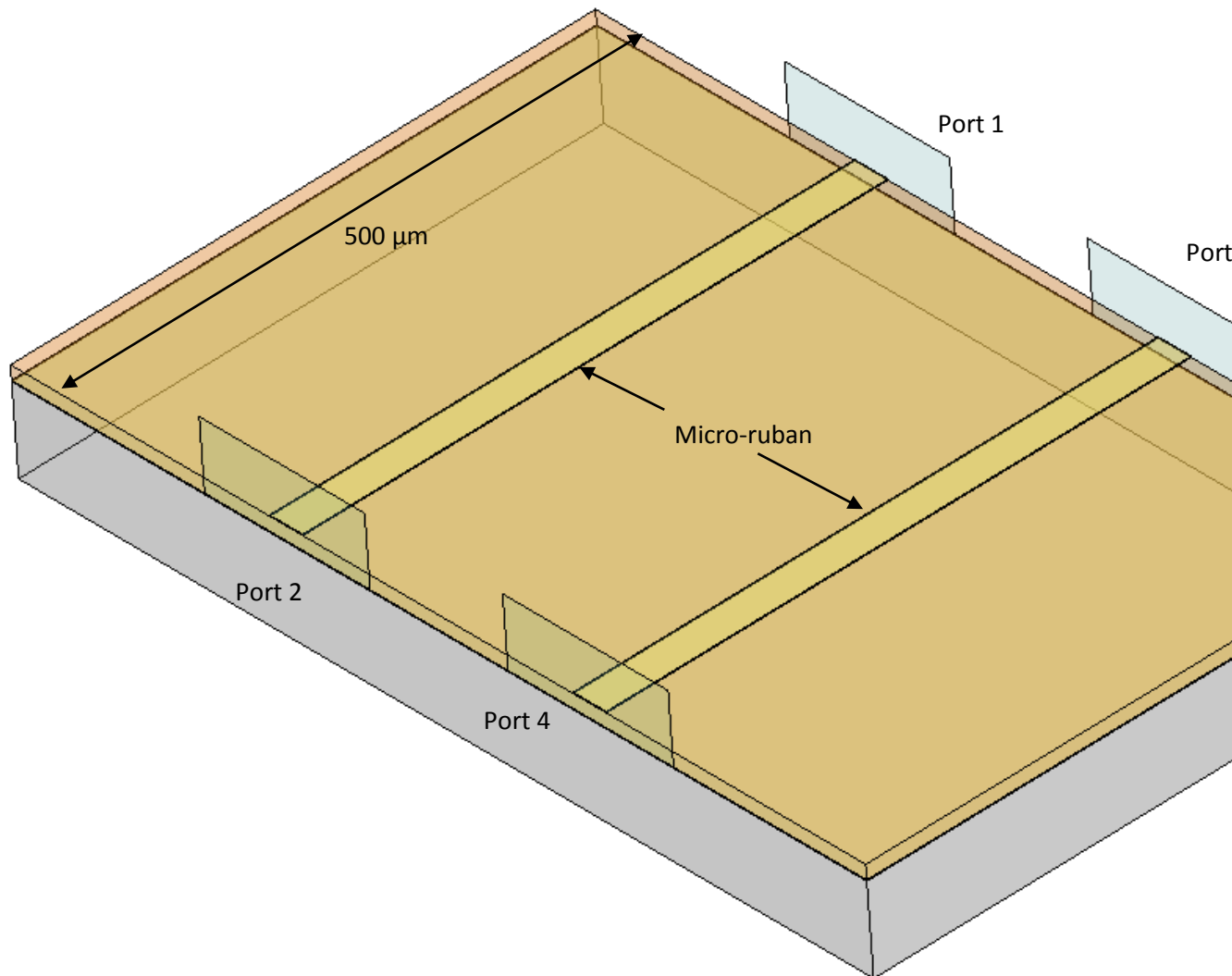


Figure 7-5 : Structure à double lignes micro-rubans

Les résultats de transmission entre les ports (1 et 3) ou (2 et 4) nous permettent de quantifier le couplage entre les lignes micro-rubans et ainsi d'isoler les paramètres S entre les ports (1 et 4), qui correspondent au couplage électromagnétique des transitions coaxiales. Ces résultats sont présentés Figure 7-6 et Figure 7-7, toujours avec une variation de l'espacement de 5 à 100 μm .

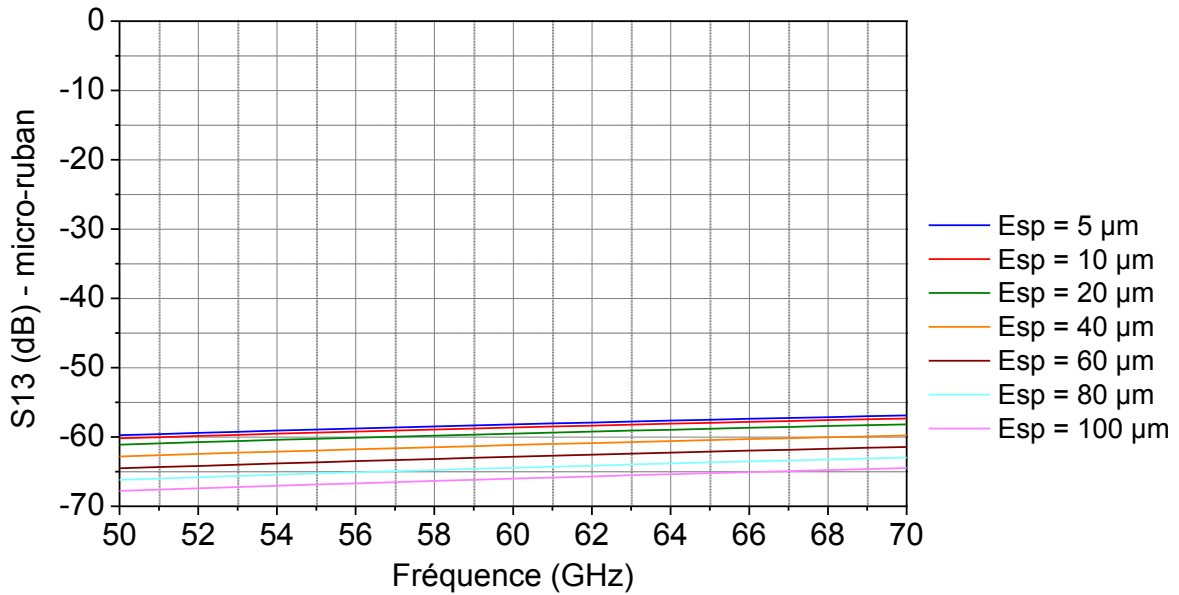


Figure 7-6 : Coefficient de transmission (S_{13}) pour une structure à double ligne micro-ruban pour différents espacements

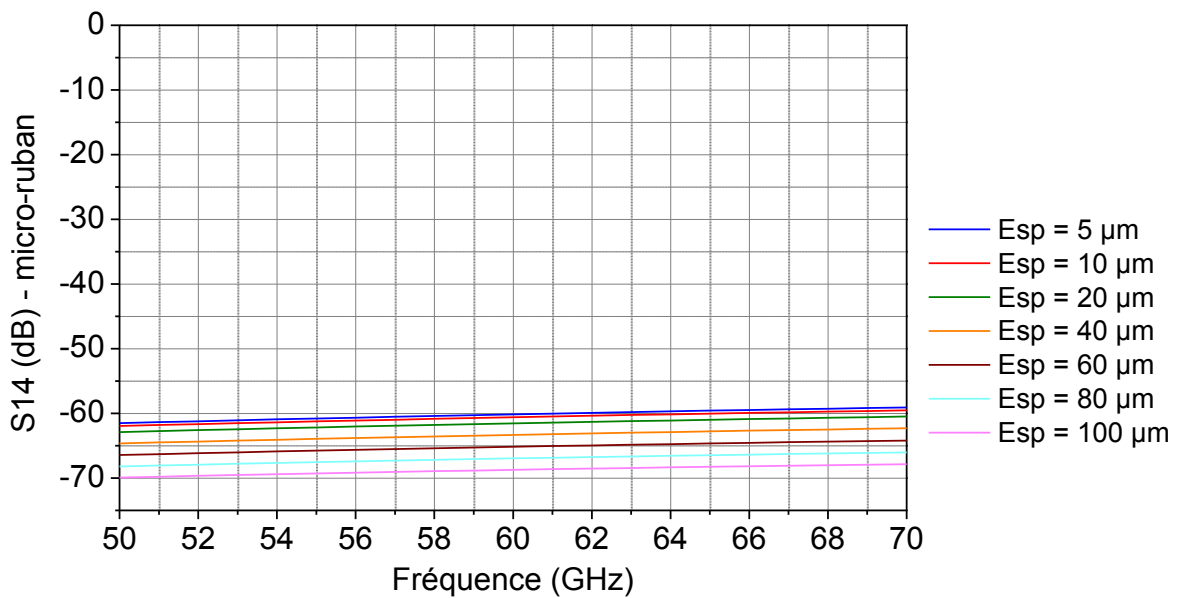


Figure 7-7 : Coefficient de transmission (S_{14}) pour une structure à double ligne micro-ruban pour différents espacements

Nous pouvons d'ores et déjà observer une différence d'environ 15 dB entre les résultats de la structure complète et ceux de la ligne micro-ruban seule, ce qui laisse présager un couplage non négligeable dû simplement aux transitions.

Nous avons utilisé le logiciel ADS pour effectuer le deembedding des lignes micro-rubans de la simulation complète, afin de déterminer le couplage de la transition verticale seule. Ce logiciel nous permet de créer une structure à huit pôles, en faisant un deembedding des lignes micro-rubans couplées de part et d'autre de la transition. Le schéma de la simulation est illustré Figure 7-8.

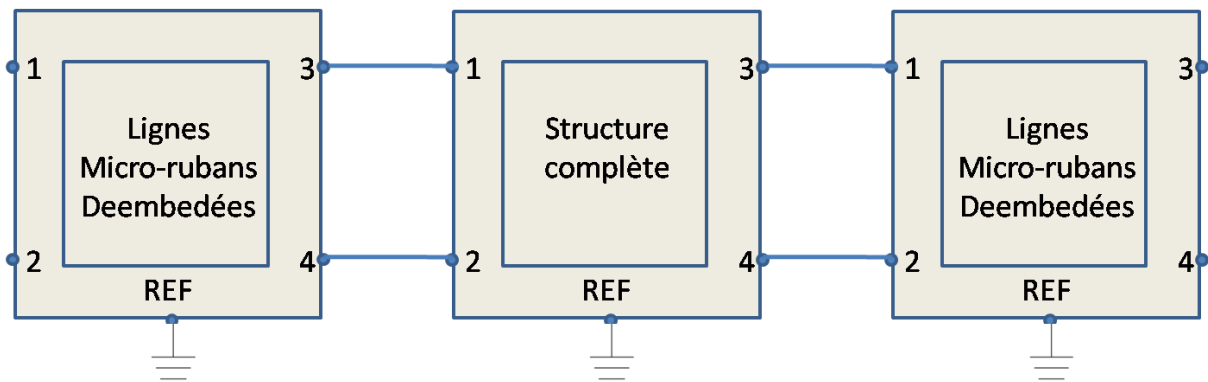


Figure 7-8 : Architecture utilisée lors des simulations afin de déterminer le couplage de la transition verticale seule

Pour la conception de ce modèle, les résultats de simulations en paramètres S ont été exportés de HFSS pour être importés dans ADS. Le module du centre correspond aux résultats de simulations de la structure complète, intégrant les transitions verticales ainsi que les lignes micro-rubans en surface. Les modules aux extrémités intègrent les résultats de simulations des lignes micro-rubans couplées. Ce modèle calcule un deembedding des lignes micro-rubans (aux extrémités) sur la structure complète (au centre). Par cette méthode nous avons pu isoler le couplage électromagnétique dû aux seules transitions verticales. Les résultats de simulations sont illustrés Figure 7-9 et Figure 7-10.

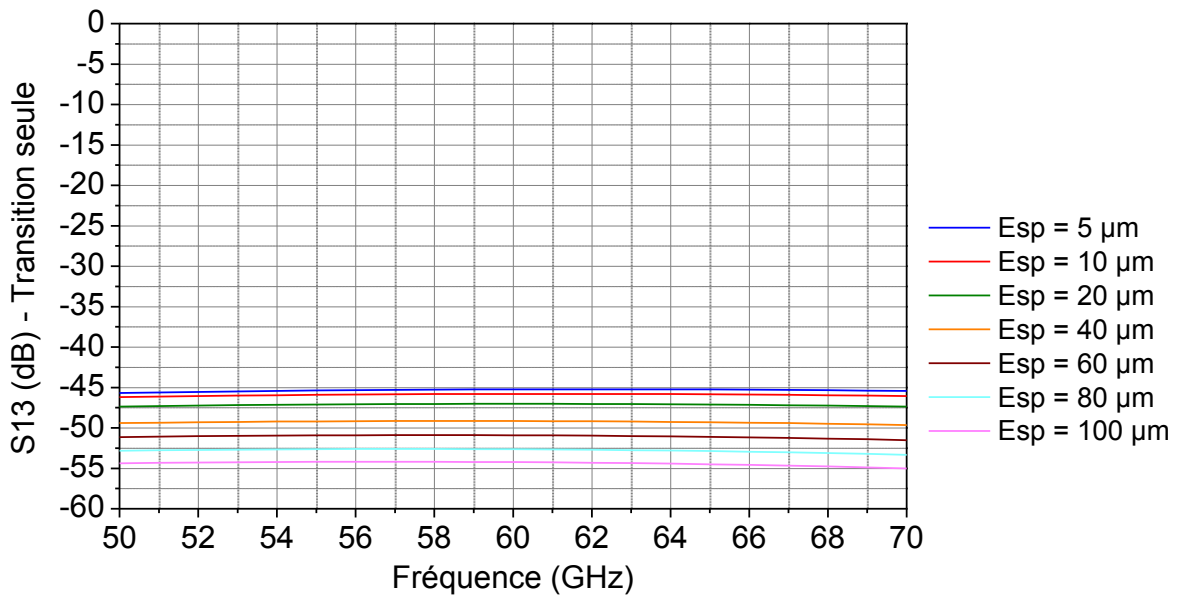


Figure 7-9 : Coefficient de transmission (S_{13}) dû au couplage électromagnétique de la transition verticale seule

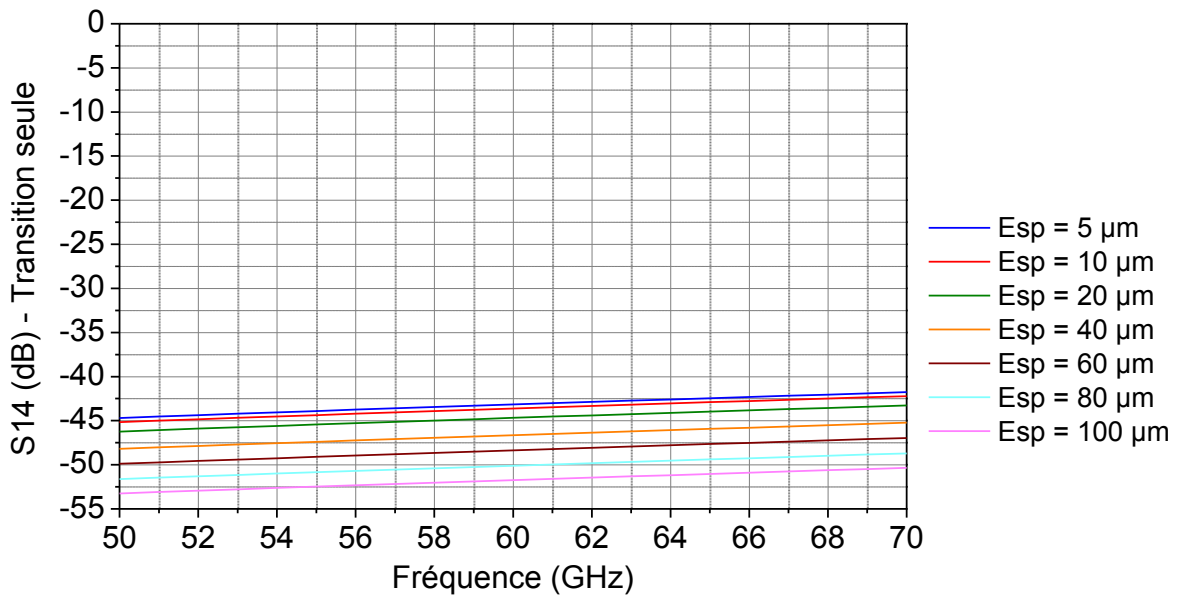


Figure 7-10 : Coefficient de transmission (S_{14}) dû au couplage électromagnétique de la transition verticale seule

Sur ces courbes, on observe que le couplage entre transitions voisines est faible mais non négligeable. Pour un espacement de 20 μm entre les vias de masse les plus proches, le coefficient de transmission à 60 GHz est de -47 dB (en S_{13} et S_{14} les valeurs sont sensiblement les mêmes).

Nous avons approfondi cette étude sur des transitions comportant moins de vias de masses et dans différentes topologies, afin d'avoir des points de comparaison. Les topologies étudiées se différencient par le nombre de vias de masse, quatre, six ou huit, et par la configuration de placement des transitions voisines l'une par rapport à l'autre, alignée ou décalée. Ces configurations sont illustrées sur les Figure 7-11 à Figure 7-13.

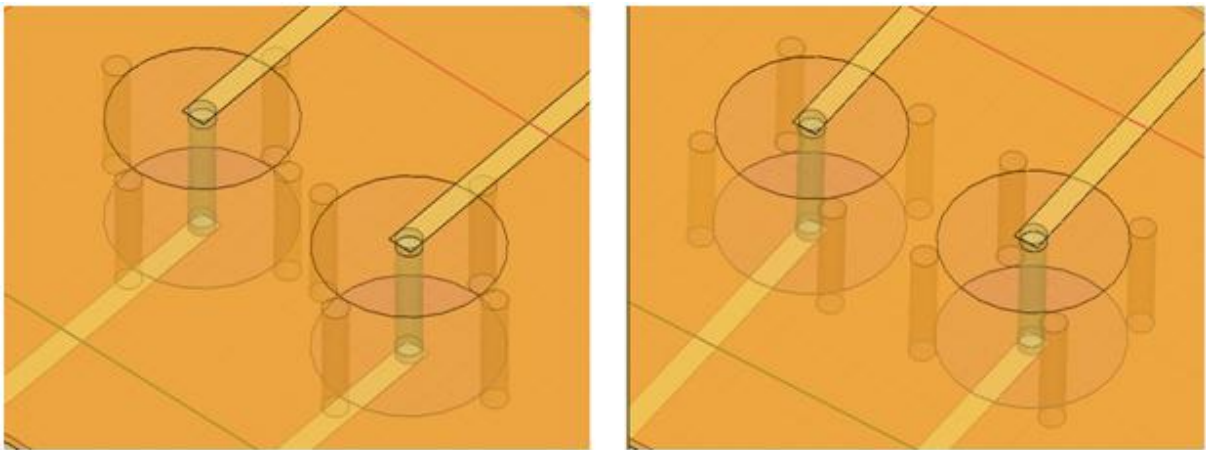


Figure 7-11 : Quatre vias de masses en configuration alignée (à gauche) et décalée (à droite)

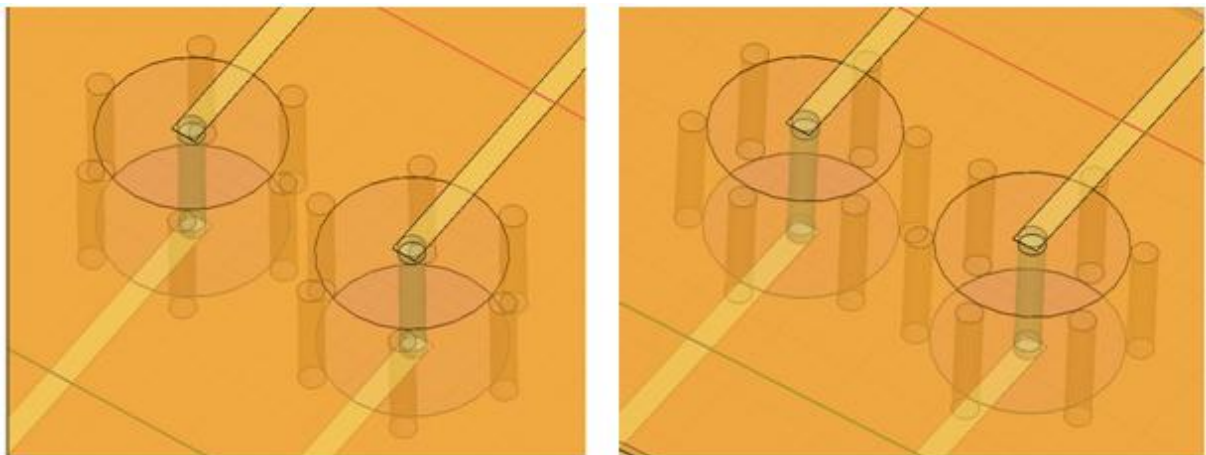


Figure 7-12 : Six vias de masses en configuration alignée (à gauche) et décalée (à droite)

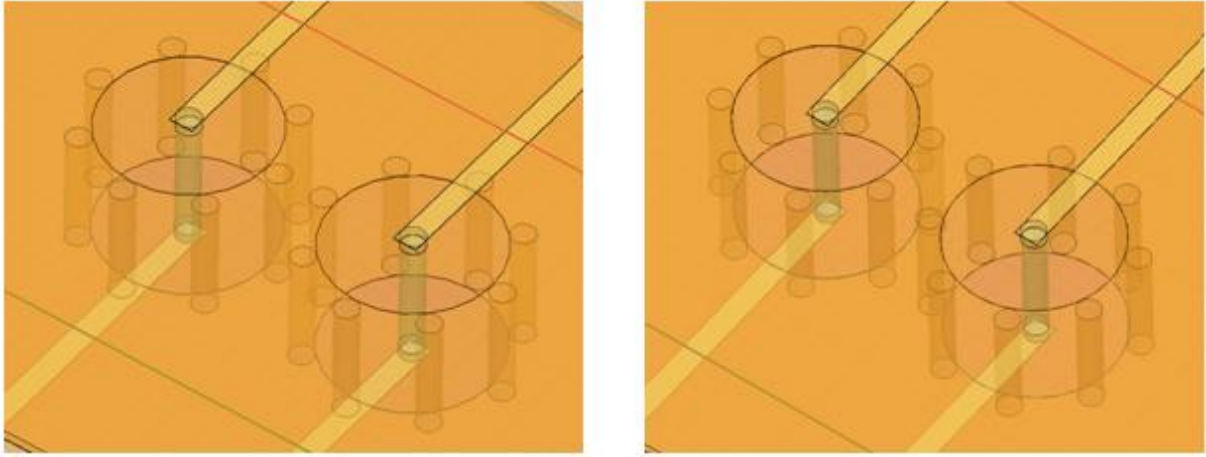


Figure 7-13 : Huit vias de masses en configuration alignée (à gauche) et décalée (à droite)

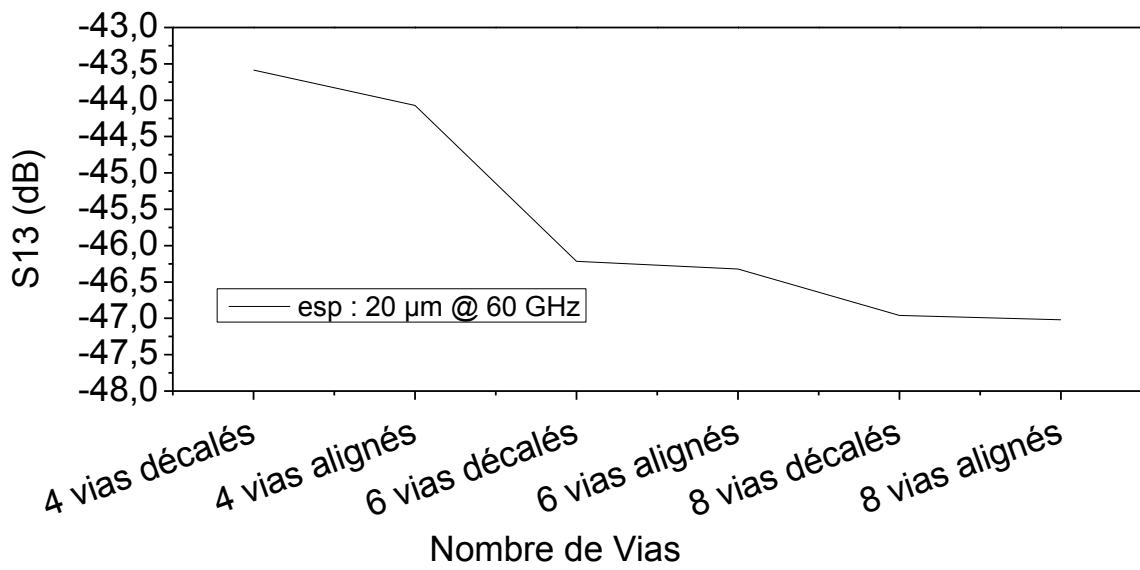


Figure 7-14 : Évolution du coefficient de transmission (S_{13}) selon le nombre de vias de masse et leur configuration

Le nombre de vias de masse joue un rôle important dans la modélisation d'un plan de masse quasi-continu autour de la transition. De ce fait, l'ajout de vias de masse optimise l'isolation de la structure quant à son environnement, réduisant le rayonnement électromagnétique parasite et les pertes de puissance dans le substrat. Avec la Figure 7-14, nous observons également que la configuration utilisée pour la position des transitions verticales voisines, l'une par rapport à l'autre, ne joue que très peu sur la valeur du coefficient de transmission. Dans chaque cas, la valeur du S_{13} est indiquée dans le Tableau 7-1.

Nombre de Vias	S_{13} (dB) @ 60 GHz
4 vias décalés	-43,5
4 vias alignés	-44
6 vias décalés	-46,2
6 vias alignés	-46,3
8 vias décalés	-46,9
8 vias alignés	-47

Tableau 7-1 : Valeurs du coefficient de transmission (S_{13}) selon le nombre de vias de masse et leur configuration

Malgré cela subsiste une partie non négligeable d'énergie rayonnée, qui est importante pour les applications basse consommation et faible puissance pour lesquelles nous travaillons.

Une transition verticale qui rayonne de façon parasite est également sensible à son environnement et aux rayonnements parasites provenant de systèmes annexes. La globalité du système et l'hétérogénéité de cette technologie d'intégration impose une complète isolation entre structures de propagation hautes fréquences, pouvant propager des signaux de puissance infime, et systèmes numériques basses fréquences utilisés notamment pour l'intelligence embarquée, travaillant avec des pics de puissance élevés, capable de perturber les systèmes voisins.

8 CHANGEMENT DE DIELECTRIQUE - COAX BCB

Pour les raisons citées précédemment, c'est-à-dire une réduction de l'encombrement et du couplage électromagnétique, ainsi que l'utilisation de substrats de silicium basse résistivité, nous avons modifié la structure pour l'isoler complètement du substrat et de son environnement.

Pour les mêmes raisons qui ont poussé l'utilisation du BCB en tant que diélectrique des structures de propagation en surface, nous l'utilisons comme diélectrique à l'intérieur de la transition coaxiale, c'est-à-dire comme diélectrique du coaxial. Cette modification nous a permis plusieurs optimisations :

Étant donné le changement de matériau, il est nécessaire de graver le substrat de silicium pour y insérer le BCB. De ce fait, après gravure du substrat, il est possible de déposer le métal sur les flancs de la cavité, qui, connecté au plan de masse en surface du substrat, servira de plan de masse pour la transition coaxiale. De ce fait, l'utilisation des vias de masse n'est plus nécessaire. Ceci permet de créer un plan de masse réellement continu pour la transition, ce qui l'isole totalement du substrat, et évite ainsi tout rayonnement dans le substrat. La pollution électromagnétique de cette transition est donc réduite au seul rayonnement des structures de propagation en surface.

De même, l'isolation électromagnétique de la transition par rapport au substrat permet d'utiliser cette transition sur n'importe quel type de substrat. Les lignes de propagation en surface étant des lignes micro-rubans, la transition étant réellement coaxiale, toute la structure de transition est donc complètement indépendante du substrat utilisé du point de vue électromagnétique. Ceci nous autorise donc à utiliser du silicium bas coût, ou tout autre substrat, ce qui renforce l'esprit d'intégration hétérogène du concept d'intégration SiP. La seule contrainte réelle à ce niveau sera une compatibilité thermomécanique entre le substrat et la transition.

Enfin, le matériau utilisé comme diélectrique dans la transition coaxiale est le BCB. La permittivité relative du BCB est de 2,65, c'est-à-dire plus de quatre fois plus faible que celle du silicium. Le rapport d'aspect n optimal est à réétudier, mais cette réduction laisse envisager une réduction conséquente de l'encombrement de la transition coaxiale.

La transition coaxiale ainsi modifiée est présentée Figure 8-1. Une vue en coupe est présentée Figure 8-2.

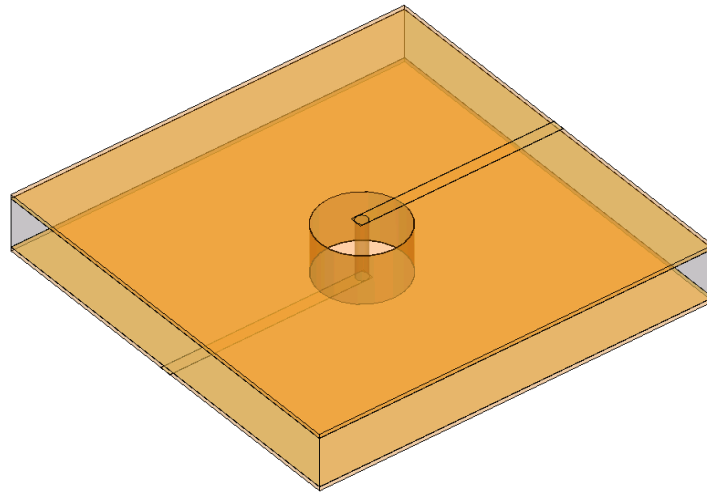


Figure 8-1 : Transition coaxiale utilisant du BCB comme matériau diélectrique

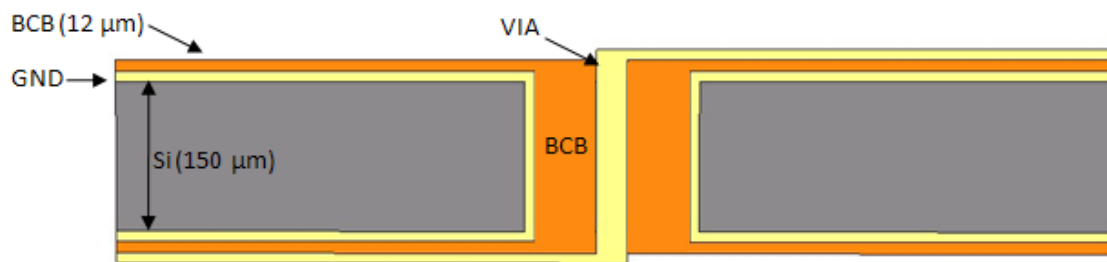


Figure 8-2 : Vue de coupe de la transition coaxiale BCB

Les résultats de simulations électromagnétiques de cette structure sont présentés Figure 8-3 et Figure 8-4. Une optimisation du rapport n a été faite de façon à obtenir les meilleurs résultats en paramètres S .

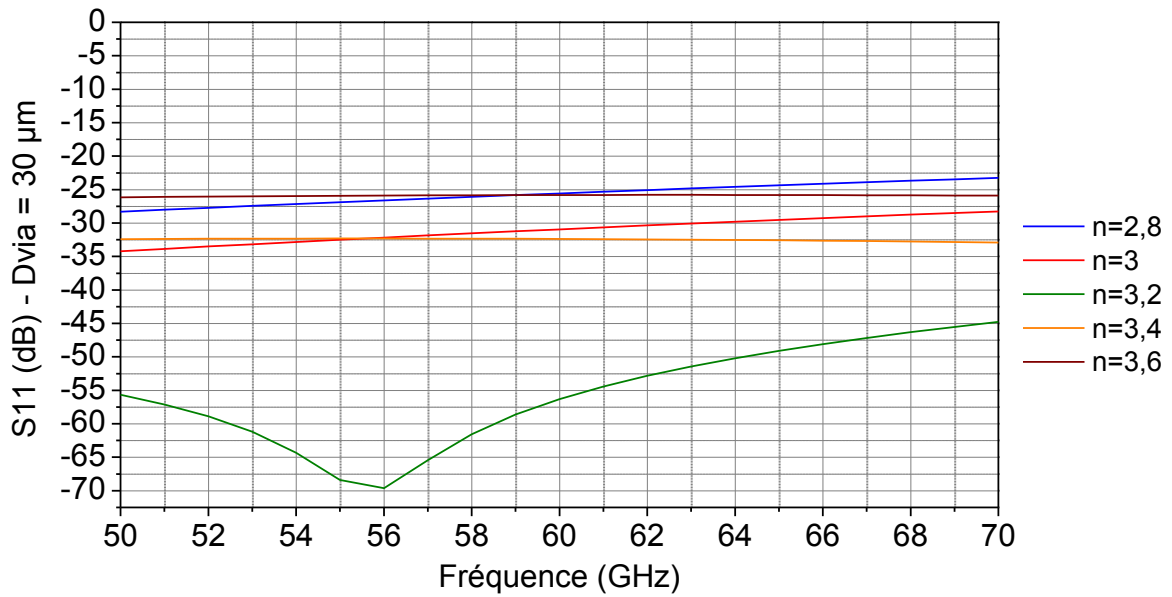


Figure 8-3 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale BCB selon différents rapport n allant de 2,8 à 3,6

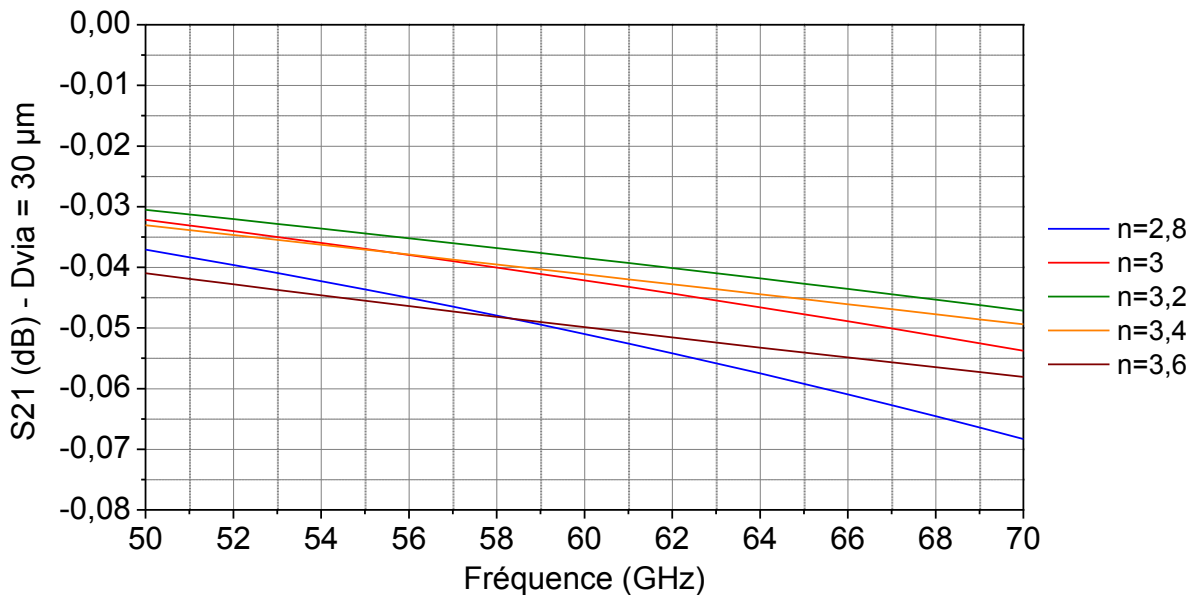


Figure 8-4 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale BCB selon différents rapport n allant de 2,8 à 3,6

Pour un diamètre de via de 30 μm , les meilleures performances se situent pour un rapport n de 3,2, avec un coefficient de réflexion de -66 dB et un coefficient de transmission de -0,038 dB à 60 GHz. Un rapport n de 3,2 signifie un encombrement surfacique de la transition coaxiale de $7.10^3 \mu\text{m}^2$. Ces résultats vont être comparés à ceux des structures précédentes pour mettre en évidence l'optimisation de la structure.

8.1 Comparaison des résultats des différentes structures.

Les Figure 8-5 et Figure 8-6 présentent une comparaison des résultats de simulations électromagnétiques des structures étudiées jusqu'ici.

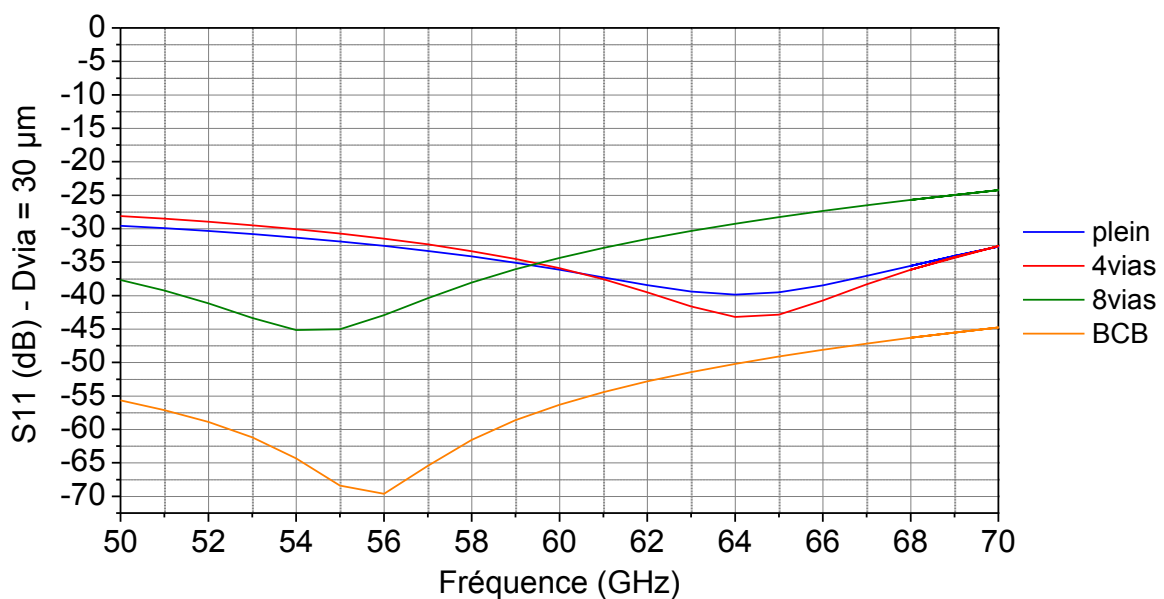


Figure 8-5 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) des différentes structures étudiées

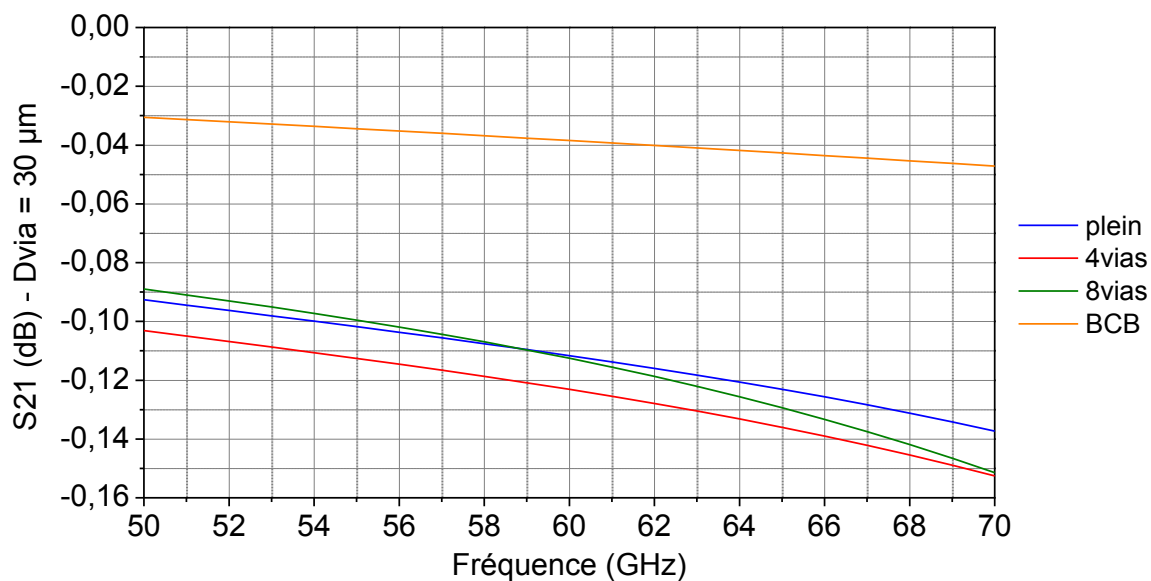


Figure 8-6 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) des différentes structures étudiées

La comparaison des différentes structures montre que la transition BCB obtient de bien meilleurs résultats en termes de performances électromagnétiques que ses concurrentes. Le coefficient de réflexion est en moyenne à 15 dB sous celui des autres structures, et les pertes en transmission se trouvent réduites d'environ 0,7 dB sur la bande 50 - 70 GHz.

Le Tableau 8-1 présente les résultats chiffrés des différentes structures pour une âme centrale d'un diamètre de 30 μm , sur un substrat de silicium haute résistivité.

	Coaxial Silicium	Structure 4 vias	Structure 8 vias	Structure BCB
S11 @ 60 GHz (dB)	-36	-36	-34	-56
S21 @ 60 GHz (dB)	-0,12	-0,12	-0,11	-0,038
Rapport n	7	7	7	3,2
Encombrement surfacique (μm^2) E	$34 \cdot 10^3$	$57 \cdot 10^3$	$57 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$

Tableau 8-1 : Récapitulatifs des propriétés de chaque structure étudiée

On note que la structure en BCB offre de meilleurs résultats dans tous les domaines, avec de meilleures performances électromagnétiques et un encombrement divisé par trois. De plus, comme nous l'avons vu, la structure BCB offre une isolation électromagnétique totale par rapport au substrat, ce qui implique la possibilité d'utiliser n'importe quel type de substrat.

Nous avons précédemment fait l'étude de la structure 8 vias sur un substrat de silicium basse résistivité. Nous l'avons également faite pour la structure BCB. Les résultats sont présentés dans le paragraphe suivant, ainsi qu'une comparaison des résultats de chaque structure.

8.2 Comparaison BCB-8 vias sur LRS

La structure coaxiale BCB est totalement isolée du substrat. De ce fait les performances électromagnétiques de la transition sont indépendantes du substrat. Les résultats de simulation en paramètres S sont présentés en annexes. Ceci valide la possibilité d'utilisation d'un substrat quelconque comme support de propagation, ce qui renforce l'intérêt de l'utilisation de cette transition coaxiale pour les applications d'intégration hétérogène. Les Figure 8-7 et Figure 8-8 présentent une comparaison des résultats de simulations des deux structures, à 8 vias et BCB, sur un substrat de silicium basse résistivité.

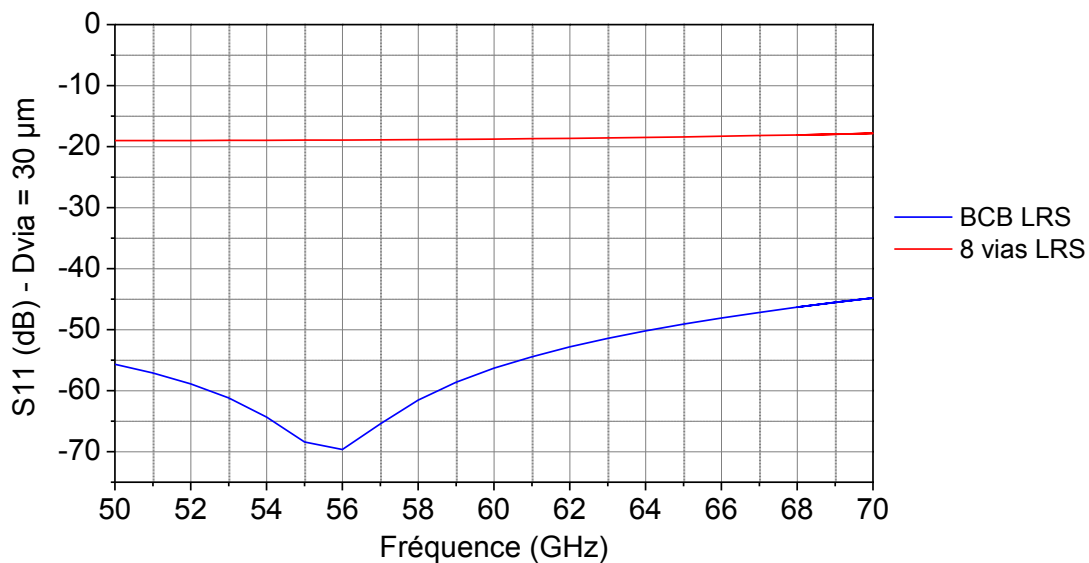


Figure 8-7 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) des différentes structures étudiées sur silicium basse résistivité

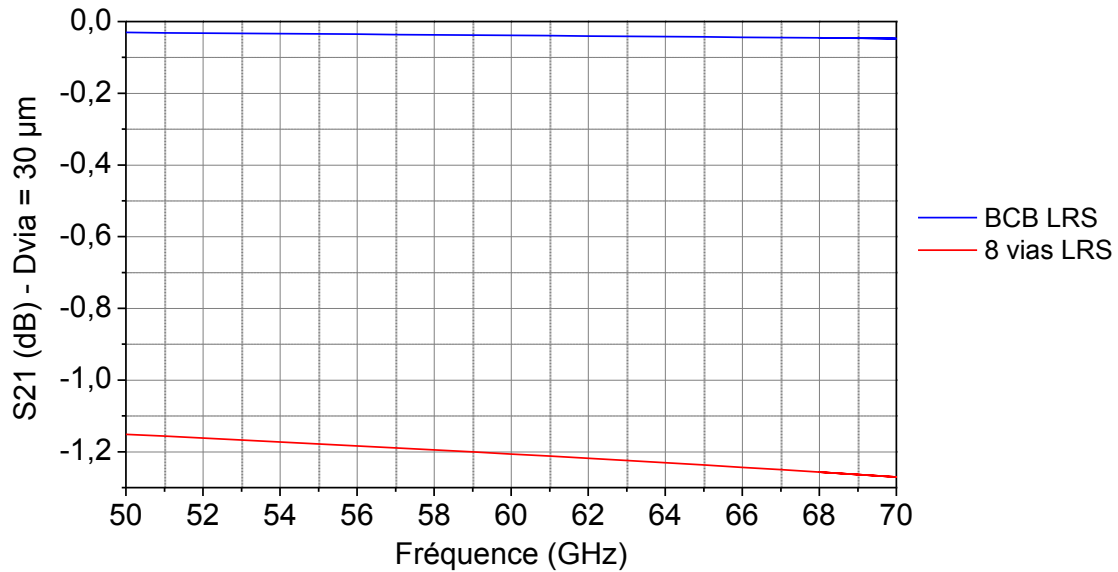


Figure 8-8 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) des différentes structures étudiées sur silicium basse résistivité

Ces résultats montrent le net avantage que prend la transition coaxiale BCB sur ses concurrentes, notamment la transition coaxiale à 8 vias, avec un gain en coefficient de réflexion de plus de 15 dB sur la bande 50 - 70 GHz, et une réduction des pertes de transmission de plus de 1,15 dB sur cette bande de fréquence.

Les paragraphes suivants présentent l'étude du rayonnement de la structure dans son environnement, permettant d'évaluer le couplage électromagnétique parasite ainsi que les pertes de transmission dues au rayonnement.

8.3 Carte du champ électrique dans la structure

La Figure 8-9 présente la carte du champ électrique E dans le plan de coupe vertical de la transition coaxiale BCB. Au niveau de la transition coaxiale, le champ E est intégralement contenu dans le diélectrique, à savoir le BCB, phénomène pressenti lors de notre étude. Par contre les structures de propagation en surface, qui sont des lignes micro-rubans, ainsi que la zone de rupture entre les lignes micro-rubans et la transition, rayonnent de façon non négligeable dans l'air environnant. Ce phénomène dissipe une partie de l'énergie dans l'environnement, ce qui joue, légèrement, sur les pertes en transmission, et crée un couplage électromagnétique entre lignes voisines.

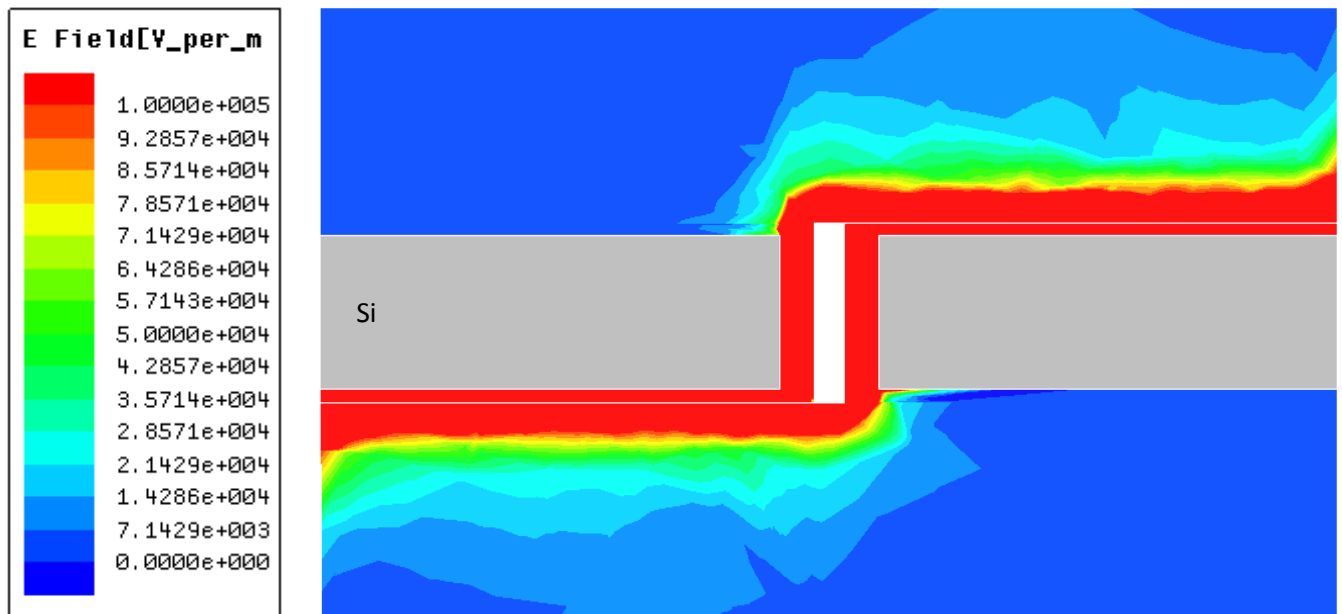


Figure 8-9 : Plan de coupe du champ électrique de la transition coaxiale BCB

De plus, pour une technologie d'intégration 3D, les niveaux sont superposés. Un matériau, substrat, diélectrique ou autre, se trouve donc au-dessus de la transition. La présence de ce matériau influera fortement sur les performances de notre transition.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons une méthode visant à diminuer, voire complètement annuler, le rayonnement dans l'air de la structure, ou un quelconque couplage parasite avec des matériaux ou structures situés en-dessous ou au-dessus de la transition.

8.4 Optimisation des structures de propagation en surface - Passage au triplaque

En étudiant la topologie de notre structure, il s'est avéré nécessaire, pour diminuer le rayonnement électromagnétique de la structure, d'isoler électriquement la structure de propagation en surface ainsi que la rupture de géométrie à l'interface transition coaxiale / ligne micro ruban. Pour cela, la structure utilisée en surface a été modifiée, utilisant non plus une ligne micro-ruban mais une ligne triplaque. Ce type de ligne possède l'intérêt, à l'identique du coaxial, d'être totalement isolé de l'environnement par un plan de masse. La Figure 8-10 présente une comparaison entre ligne micro-ruban et ligne triplaque.

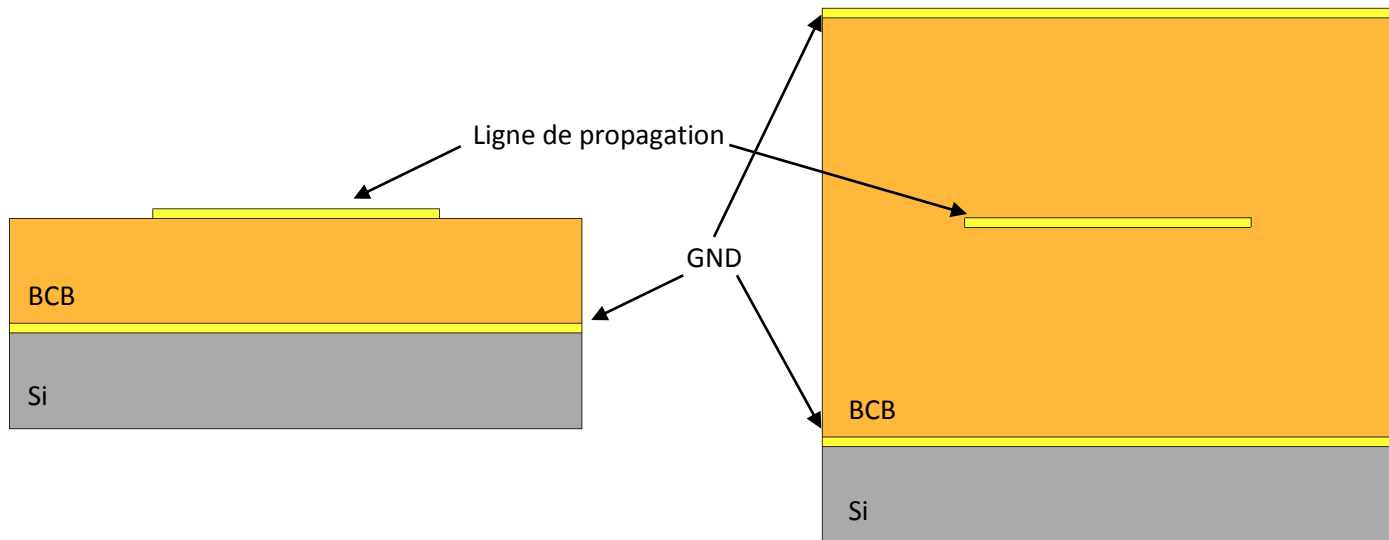


Figure 8-10 Comparaison de modèles de lignes de propagation micro-ruban ligne triplaqué

L'isolation de la structure de propagation et de ce fait de la rupture de géométrie va permettre de contenir l'énergie exclusivement dans le diélectrique, ici le BCB.

La Figure 8-11 présente la structure utilisant les lignes triplaques, et la Figure 8-12 présente le champ électrique sur une coupe au niveau de la transition.

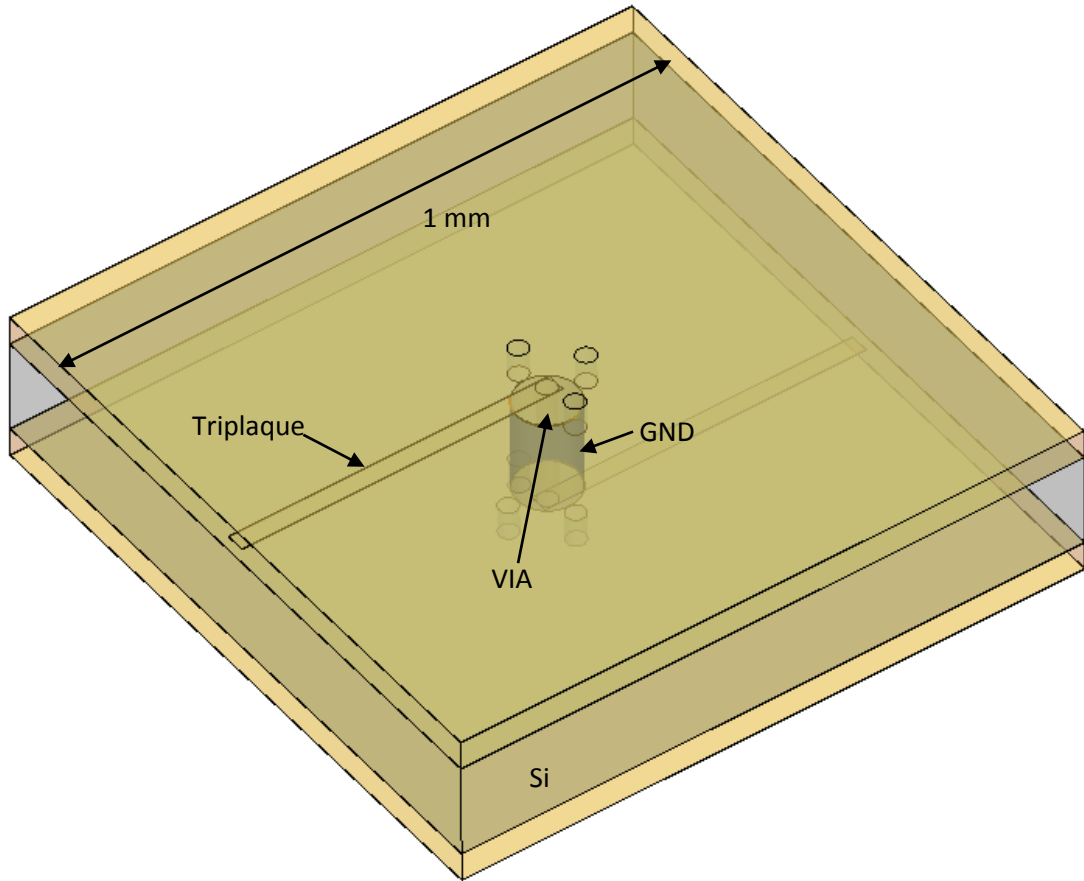


Figure 8-11 : Structure coaxiale BCB utilisant les lignes triplaques en surface

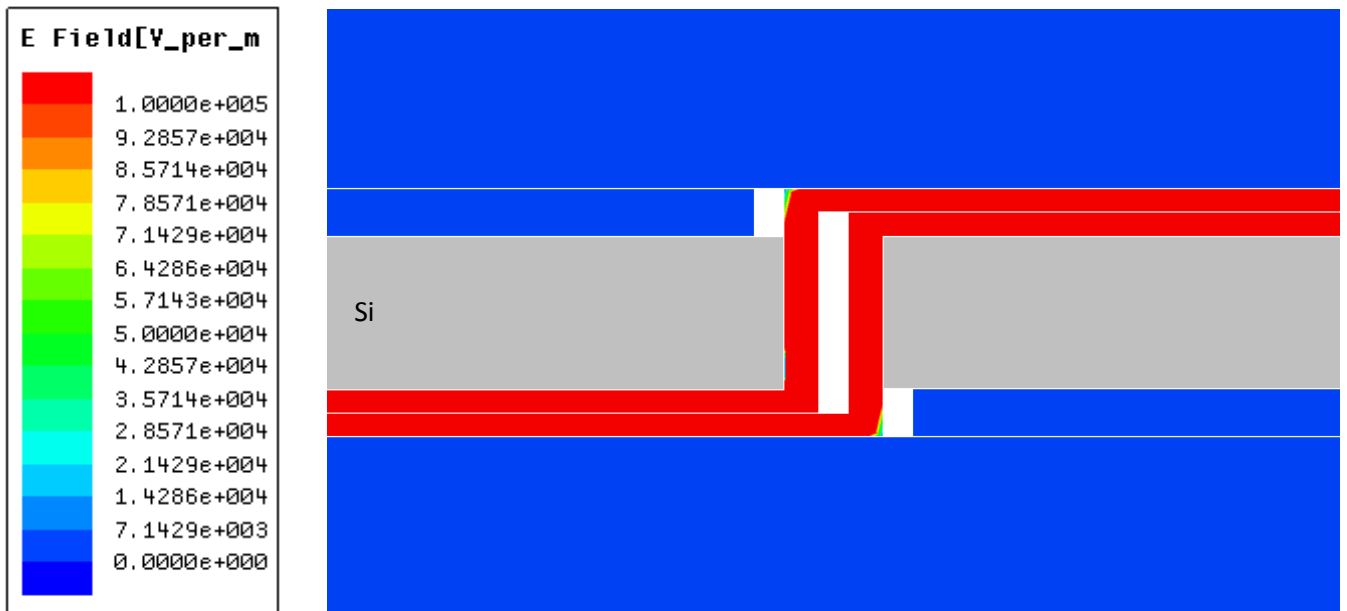


Figure 8-12 : Plan de coupe de la structure coaxiale BCB utilisant les lignes triplaques en surface

On constate que l'énergie est complètement contenue dans la structure, aucun rayonnement n'a lieu dans l'environnement, du fait de l'isolation totale de la structure par des plans de masse.

Nous présentons dans les Figure 8-13 et Figure 8-14 les résultats de simulations en paramètres S de cette structure, comparés aux résultats de simulations de la structure à lignes micro-ruban.

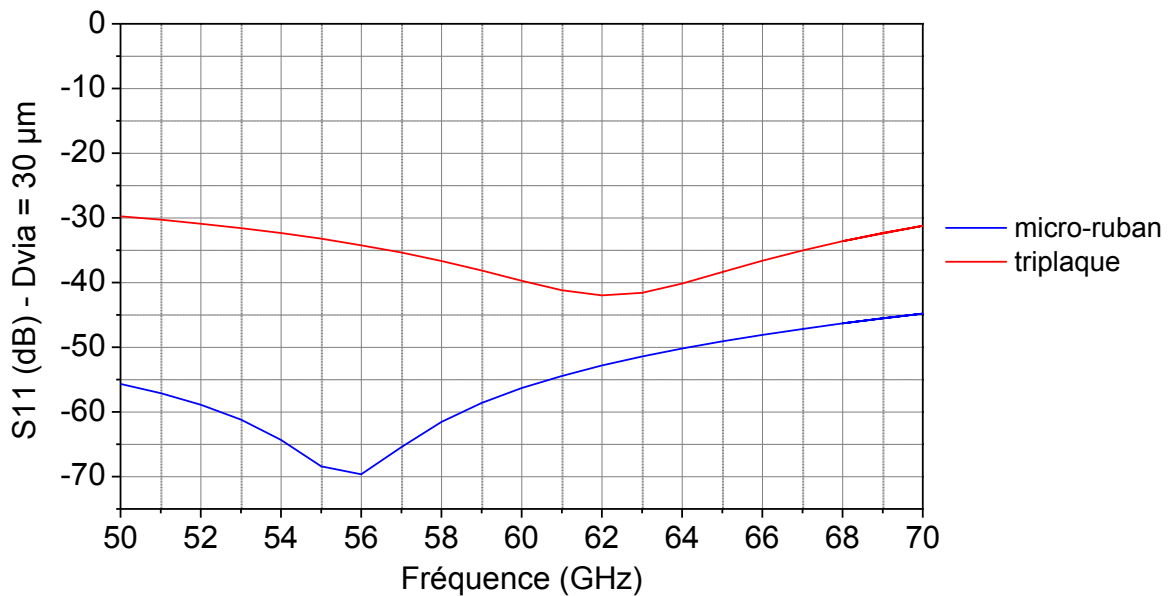


Figure 8-13 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) des structures à lignes micro-rubans et triplaques

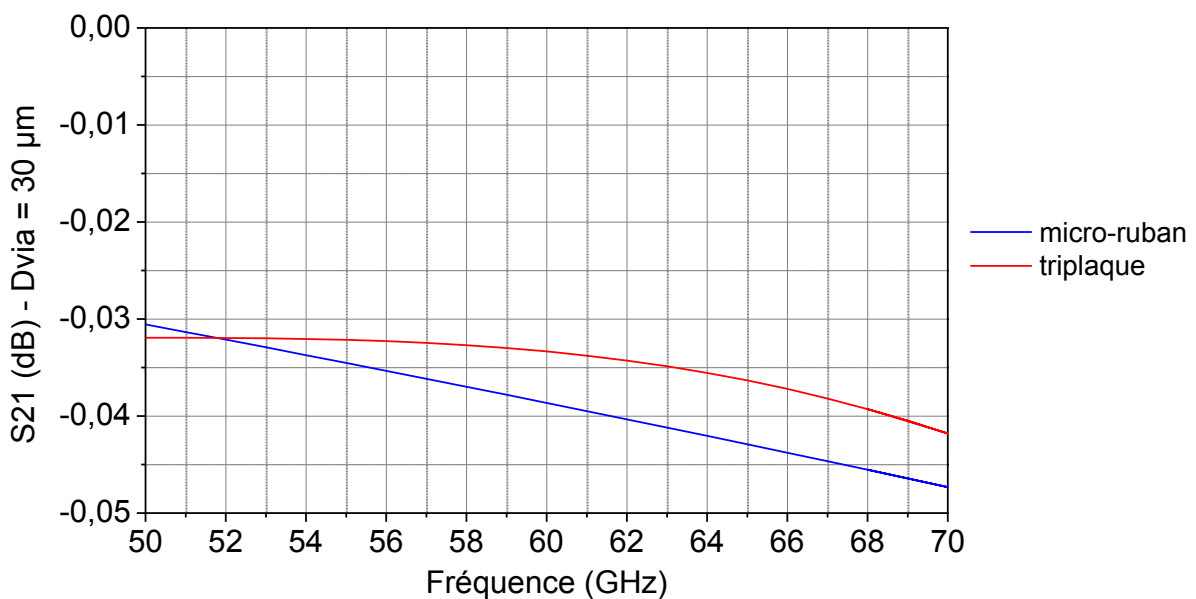


Figure 8-14 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) des structures à lignes micro-rubans et triplaques

Cette structure a dû être réadaptée, la rupture de géométrie étant modifiée, le rapport n de la transition coaxiale n'était plus optimisé. Cette étude nous a donc permis de réévaluer ce rapport n optimal à 4,4. Le Tableau 8-2 présente un résumé comparatif des deux structures, l'une utilisant des lignes triplaques et l'autre des lignes micro-ruban.

Critères	Structure micro-ruban	Structure triplaque
S_{11} @ 60 GHz (dB)	-56	-40
S_{21} @ 60 GHz (dB)	0,038	0,033
Isolation	+	++
Encombrement (μm^2)	7.10^3	$13,5.10^3$

Tableau 8-2 : Comparaison des performances des structures à lignes micro-rubans et triplaques

Cette structure utilisant des lignes triplaques en surface garde quasiment les mêmes performances électromagnétiques tout en améliorant l'isolation de la structure. Il faut noter cependant que l'encombrement surfacique est presque doublé, pour que la structure triplaque puisse obtenir de telles performances électromagnétiques.

Les Figure 8-15 et Figure 8-16 présentent les performances électromagnétiques de la structure ainsi définie en large bande, du DC à 150 GHz. On observe que les résultats de simulations montrent de très bons résultats en large bande avec des pertes de transmission inférieures à 0,2 dB sur toute la bande et un coefficient de réflexion inférieur à -15 dB.

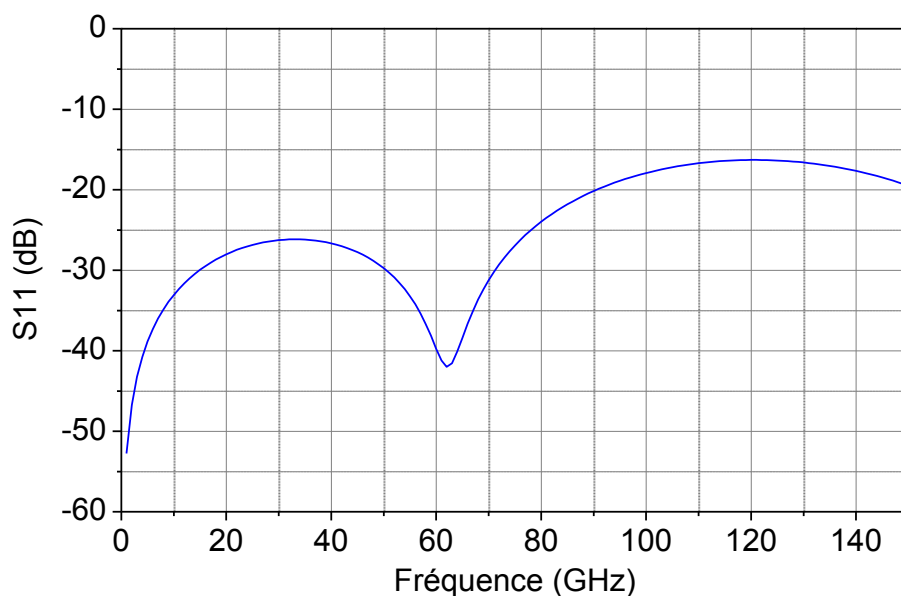


Figure 8-15 : Coefficient de réflexion (S_{11}) large bande de la transition coaxiale utilisant des lignes triplaques en surface.

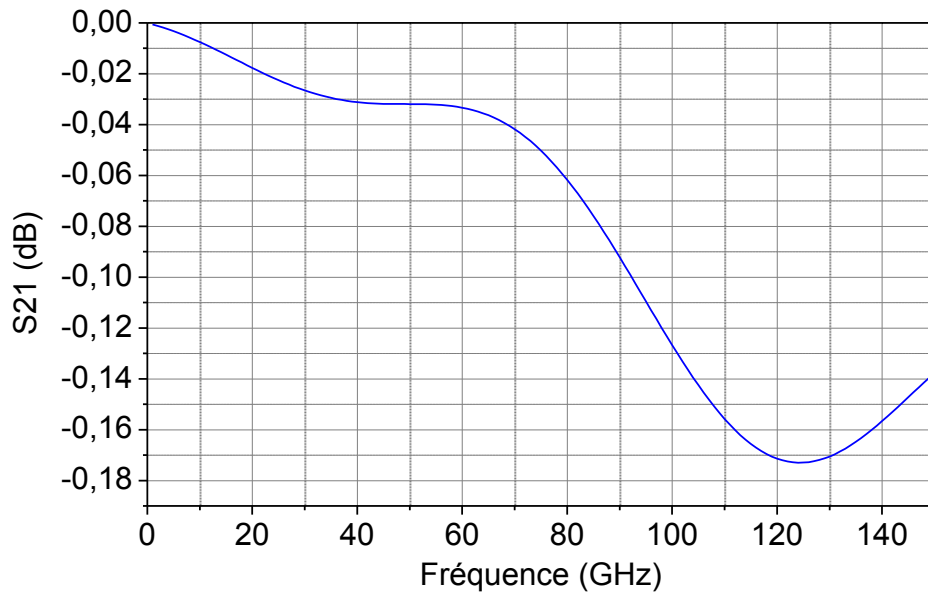


Figure 8-16 : Coefficient de transmission (S_{21}) large bande de la transition coaxiale utilisant des lignes triplaques en surface.

9 STRUCTURES DE TESTS

9.1 Modifications de la structure pour compatibilité aux mesures sous pointes

Afin de réaliser les mesures en paramètres S sur nos structures, nous avons effectué quelques modifications afin de les rendre compatibles avec les instruments de caractérisation. Ces modifications, n'affectant que les lignes de propagation en surface, ne détériorent pas les performances de nos transitions coaxiales et permettront de valider le modèle.

La structure qui sera réalisée est présentée Figure 9-1.

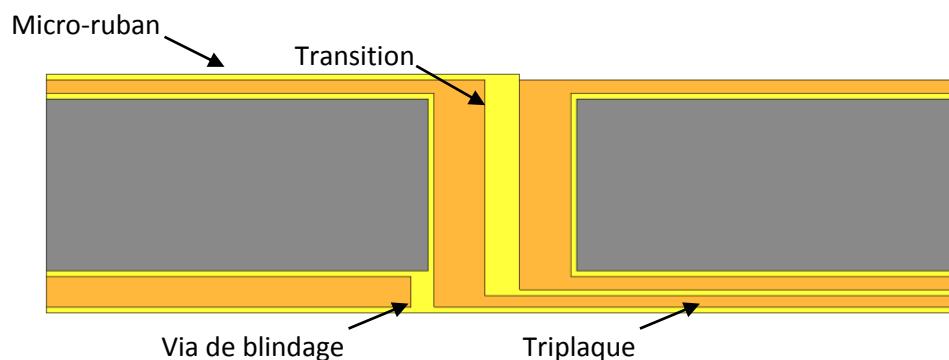


Figure 9-1 : Vue de coupe de la structure de test

Utilisant toujours la transition coaxiale BCB, les lignes de propagation en face supérieure du substrat sont des lignes micro-ruban. Les lignes micro-ruban permettent de venir poser les pointes de mesure très facilement. Sur la face inférieure du substrat, la ligne de propagation utilisée est une structure triplaque. Le support du banc de mesure sur lequel est posé l'échantillon lors des caractérisations est métallique et connecté à la masse de l'appareil. Présenter un plan de masse en face arrière du substrat, plan de masse de la ligne triplaque, permet de créer une référence supplémentaire pour la mesure des paramètres S. Enfin, les pointes de mesures étant situées sur le même plan, les transitions seront mesurées par paires, ce qu'illustre la Figure 9-2.

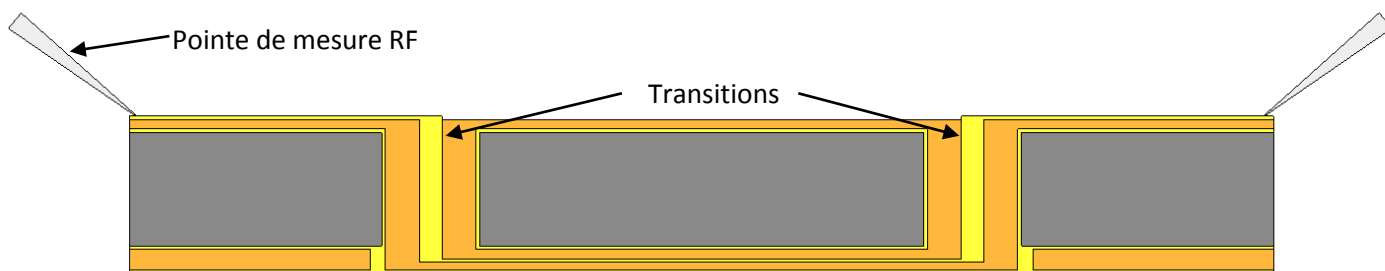


Figure 9-2 : Mise en série par paires de transitions pour la mesure sous pointes

Les pertes électromagnétiques provoquées par une paire de transitions étant très faibles, il est difficile de les mesurer, sans les confondre avec des erreurs de mesure. Pour résoudre ce problème, nous avons créé sur les motifs de tests des séries de paires de transitions, qui, accumulant les pertes provoquées par chaque transition, seront mesurables dans leur ensemble. En variant le nombre de paires de transitions dans une série, nous sommes capables de remonter aux pertes d'une seule paire de transitions.

De plus, la mesure par paire des transitions amène une difficulté supplémentaire. En effet, le but de la mesure est de connaître les performances de la transition seule. Lors de la mesure d'une structure unique, le deembedding permet de supprimer virtuellement les pertes liées aux lignes de propagation, grâce à un kit de calibration présent sur le substrat. Ici, le deembedding de la ligne triplaque située en face arrière est impossible, car n'ayant pas de mesure de référence. Les différentes séries de transitions permettent, après mesure, de remonter aux performances de la transition unique. Chaque ligne présente une suite de paires de transitions coaxiales mises bout à bout, comme présenté Figure 9-3. Ces lignes varient entre deux, quatre, six, huit, dix et douze transitions mises bout à bout. Après mesures de ces différentes lignes, nous serons capables par interpolation de remonter aux paramètres S de la transition coaxiale unique.

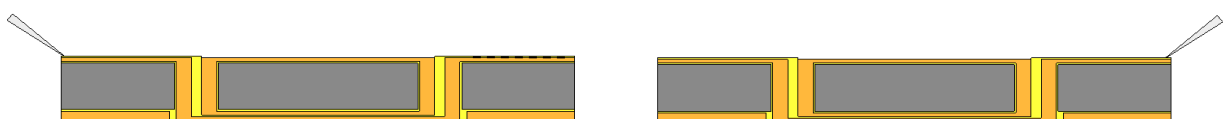


Figure 9-3 : Variation du nombre de transitions en série pour mesures sous pointes

9.2 Validation du modèle technologique – mesures de filtres

La réalisation technologique de la structure demande plusieurs étapes complexes en terme de mise en œuvre. Les transitions étant traversantes, le procédé de réalisation nécessite un usinage en face avant et en face arrière du substrat. De plus, les transitions étant situées dans le volume du substrat, les procédés de contrôle classiques (microscopie optique, microscopie électronique à balayage...) fournissent des résultats limités. De ce fait, nous avons développé une étape technologique supplémentaire permettant un contrôle de la réalisation technologique et une validation du modèle au milieu du procédé de réalisation, sans avoir besoin de réaliser la totalité des étapes technologiques.

Cette étape consiste à créer des filtres 3D grâce aux transitions. Nous verrons dans le chapitre suivant que le procédé technologique est composé de deux phases : l'usinage en face avant du substrat, puis l'usinage en face arrière. Nous sommes alors capable de valider le modèle technologique entre ces deux phases, ne réalisant alors que l'usinage en face avant.

Le principe du procédé de réalisation technologique implique qu'à la fin de la première phase, l'usinage en face avant du substrat, les transitions coaxiales sont créées dans le volume du substrat, et court-circuitées en face arrière du substrat. En réalisant une ligne de propagation continue en face avant du substrat, ponctuée par les transitions coaxiales qui s'enfoncent dans le volume du substrat, nous créons une ligne de propagation ponctuée de stubs court-circuités. Nous avons réalisé un filtre coupe bande volumique

Les Figure 9-4 et Figure 9-5 illustrent ce modèle. Une ligne micro-ruban continue joint les deux points de mesure, alors que les transitions coaxiales, court-circuitées en face arrière, font office de stubs court-circuités.

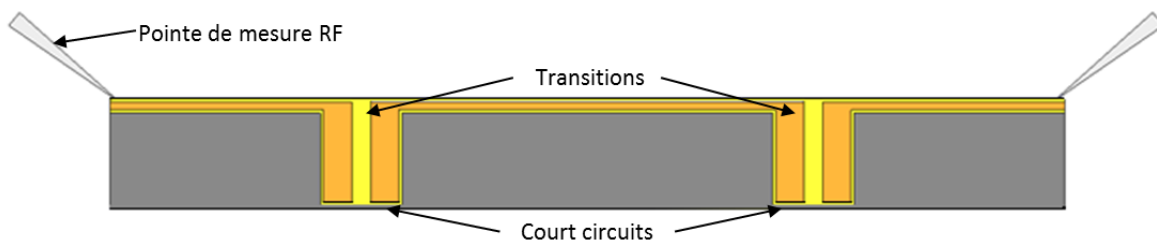


Figure 9-4 : Filtre 3D développé présentant deux stubs

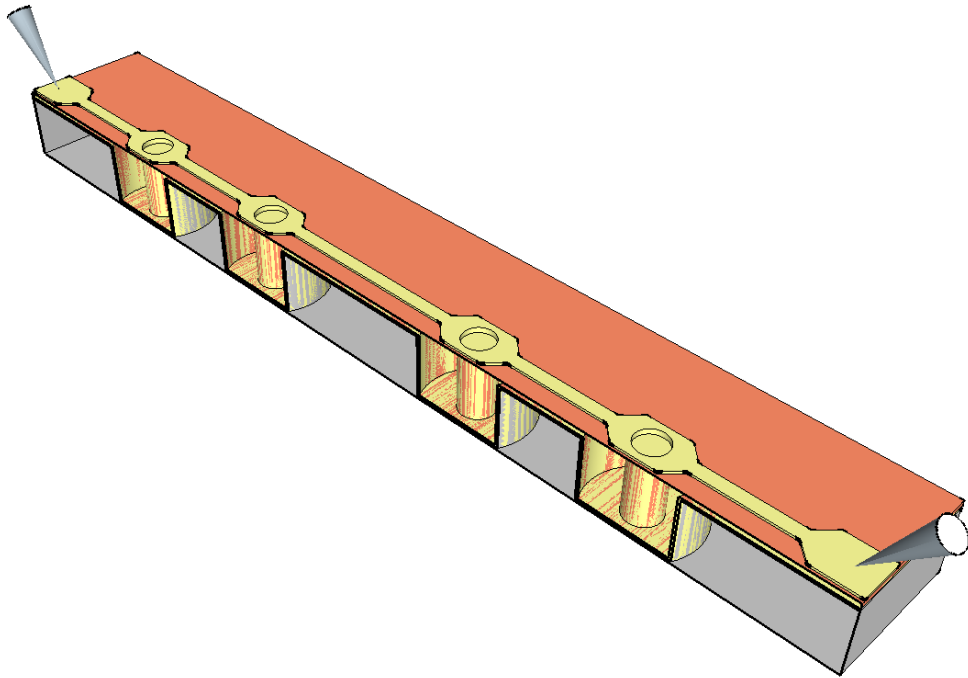


Figure 9-5 : Vue en coupe d'un filtre 3D présentant 4 stubs.

Les différentes séries de transitions créeront de ce fait plusieurs filtres différents, ayant des fréquences de coupure différentes. Les Figure 9-6 et Figure 9-7 présentent les résultats de simulations en paramètres S de l'un de ces filtres.

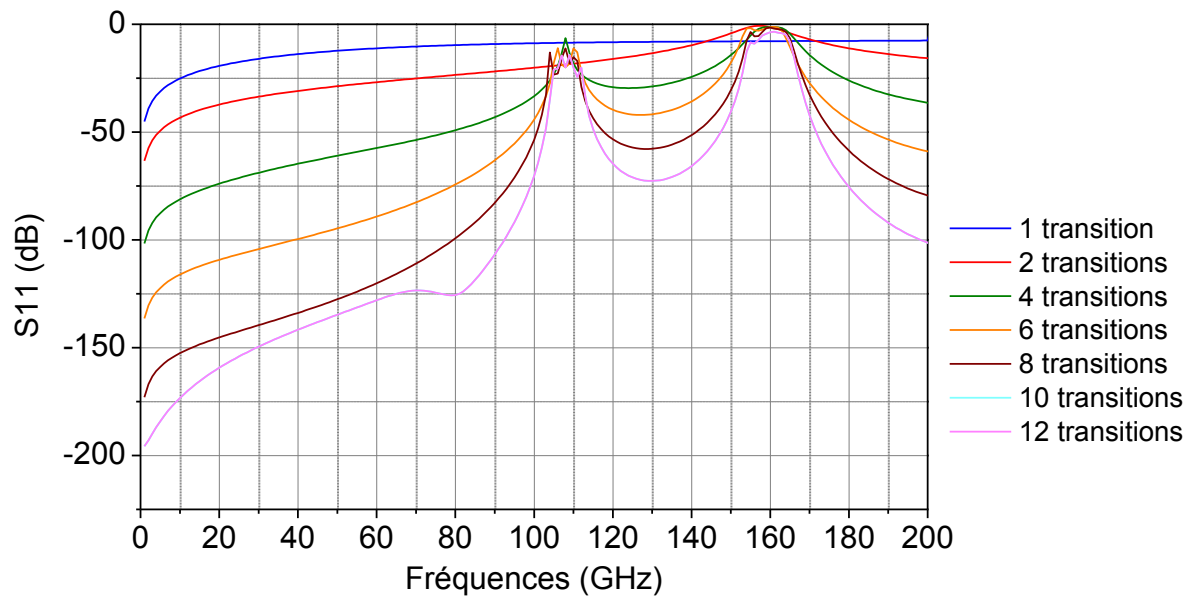


Figure 9-6 : Coefficient de réflexion (S_{11}) du filtre 3D pour différentes séries de stubs

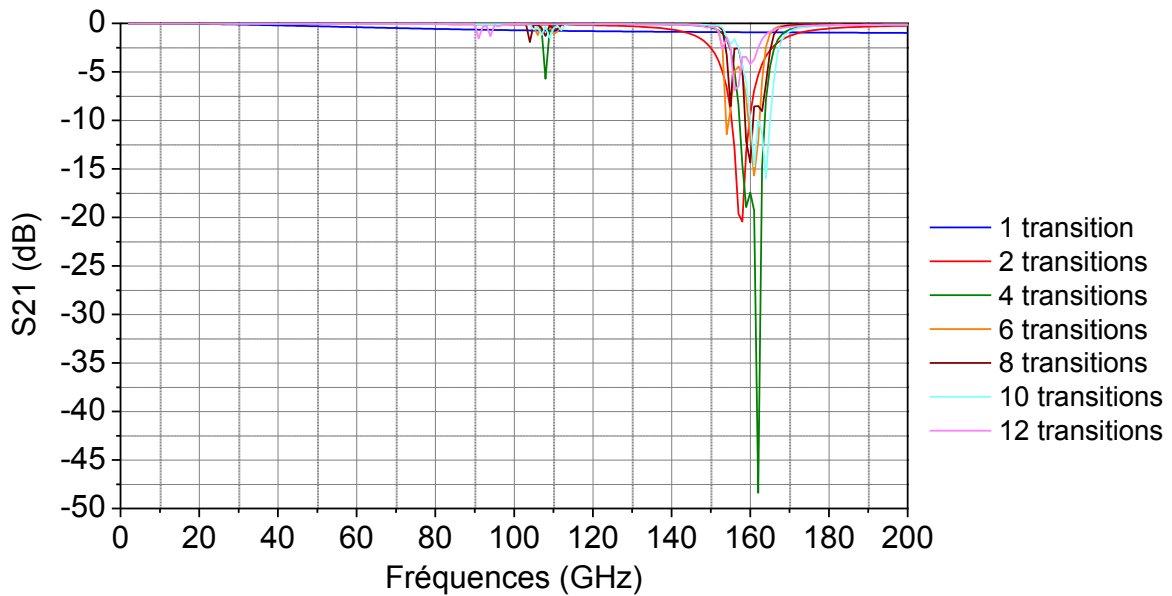


Figure 9-7 : Coefficient de transmission (S_{21}) du filtre 3D pour différentes séries de stubs

Le Tableau 9-1 quantifie les fréquences de coupure de chaque filtre, selon le nombre de paires de vias utilisées. On note que la fréquence de coupure change très peu selon le type de filtre, variant de 156 GHz à 164 GHz.

Nombre de transitions	1	2	4	6	8	10	12
Fréquence de coupure (GHz)	X	158	162	161	160	164	156

Tableau 9-1 : Fréquences de coupure présentées par les différents filtres 3D

A noter que les dimensions des lignes de propagation et transitions coaxiales restent les mêmes que pour nos structures, facilitant ainsi la validation de la technologie. La seule différence provient de la ligne micro-ruban créée entre deux transitions, là où la ligne triplaque aurait dû prendre le relais en face arrière. Ce procédé de contrôle ne nous permet pas de réutiliser le même échantillon pour le mener à terme, cette ligne de propagation en face avant ne devant pas être présente dans le procédé de réalisation final. Ce procédé nous permet de contrôler les étapes technologiques réalisées afin de valider notre modèle.

De plus, ce procédé de contrôle laisse présager l'utilisation de cette technologie pour la réalisation de filtres coupe-bande, complètement intégrés dans le volume du substrat.

10 Conclusion

Dans ces paragraphes, nous avons présenté la conception et l'optimisation des transitions coaxiales, ou Through Silicon Coaxial Via (TSCV), réalisées à l'IEMN dans le cadre de ce travail. Nous avons montré comment, à partir d'une structure coaxiale de référence, nous sommes parvenu à optimiser les transitions à modèles coaxiaux, utilisant 4 ou 8 vias pour modéliser un plan de masse continu, pour finalement créer une transition coaxiale complète. Cette structure finale améliore les performances électromagnétiques et l'encombrement, par l'utilisation du BCB en tant que matériau à très faibles pertes diélectriques ($\tan(\delta) = 0,003$) et à permittivité relative faible ($\epsilon_r = 2,65$) et l'optimisation de la géométrie de la structure. De plus, l'utilisation d'un plan de masse continu à travers le substrat, en supplément des lignes de propagation triplaques en surface, fournissent une isolation complète de la structure par rapport au reste du système, annulant ainsi tout couplage électromagnétique parasite et dissipation dans le substrat, et offrant ainsi la liberté dans le choix du type de substrat.

Les TSCV développées lors de cette étude s'adaptent aux critères des applications d'intégration hétérogène 3D, qui sont un faible coût, une miniaturisation du système par un encombrement faible, et une possibilité d'intégrer des systèmes provenant de filières technologiques différentes par une indépendance électromagnétique par rapport au type de substrat et une isolation complète par rapport aux systèmes environnants.

Nous avons présenté les motifs de tests, séries de paires de transitions qui permettront, d'une part, d'être capables de mesurer les pertes électromagnétiques causées par les transitions, et d'autre part, de remonter aux pertes d'une transition unique.

Enfin nous proposons un nouveau motif de filtres coupe-bande, qui nous permettra par ailleurs de réaliser une caractérisation intermédiaire de notre technologie bien que la totalité du procédé de réalisation technologique n'est pas effectuée.

La réalisation de ces transitions coaxiales et les résultats des mesures effectuées sur ces structures seront présentés dans le chapitre suivant. Le procédé de fabrication est une succession d'étapes complexes qui ont été développées et optimisées une à une lors de ces travaux.

CHAPITRE III - PROCÉDE DE REALISATION TECHNOLOGIQUE

1 Introduction

La conception des transitions verticales et des motifs de test ayant été présentées en détail dans le second chapitre, nous consacrerons ce dernier chapitre aux procédés de fabrication technologiques que nous avons développés à l'IEMN pour leur réalisation. L'intégration SiP implique une co-intégration des différentes fonctions du module provenant de filières technologiques hétérogènes. Pour préserver ces différents composants, actifs et passifs, nous ne devons en aucun cas dépasser leur température critique pendant les différentes étapes technologiques de notre procédé de fabrication. Pour cette raison, nous avons limité la température maximale de notre procédé de fabrication à 300 °C au niveau du scellement des substrats entre eux en choisissant la résine BenzoCycloButene (BCB) pour réaliser ce scellement. Ceci nous a aussi conduits à utiliser la résine BCB pour la réalisation des connexions verticales et des lignes de propagation.

Le développement de nos transitions s'insérant dans le cadre du projet SIPCOM, et pour garantir une compatibilité avec l'intégration SiP, nous avons choisi de réaliser nos structures sur des substrats de silicium, qui est le matériau utilisé pour le support du module dans le projet SIPCOM.

Nous présenterons également dans ce chapitre les tests électromagnétiques réalisés sur les motifs de test.

2 Procédé de fabrication des transitions coaxiales

Le développement de la technologie de fabrication des transitions coaxiales a débuté en 2008. La conception du procédé technologique a permis d'identifier les étapes clés du procédé. Certaines étapes sont complètement nouvelles et il a parfois fallu innover sur les méthodes de réalisation. Le procédé a de ce fait connu des évolutions en fonction du succès ou non de certaines étapes technologiques. Nous présentons ici chaque étape, point par point, en partant du procédé de fabrication initial. Pour chaque étape, les éventuelles évolutions seront exposées pour parvenir à une étape optimisée. L'évolution de certaines étapes entraîne parfois un retour en arrière sur les étapes précédentes pour une meilleure compatibilité. Ces évolutions seront présentées chronologiquement, en respectant la succession des évolutions qui ont permis d'aboutir à un procédé fiable. Enfin, le procédé final sera présenté dans son ensemble afin de mettre en avant la compatibilité de l'ensemble des étapes technologiques.

2.1 Procédé de fabrication initial

La conception des transitions coaxiales a été développée en tenant compte des conditions de réalisation technologique. Un premier procédé de réalisation a été développé pour les fabriquer. Il a été conçu à partir de l'expérience et de l'expertise technologique des différents acteurs du projet. Il est présenté Figure 2-1.

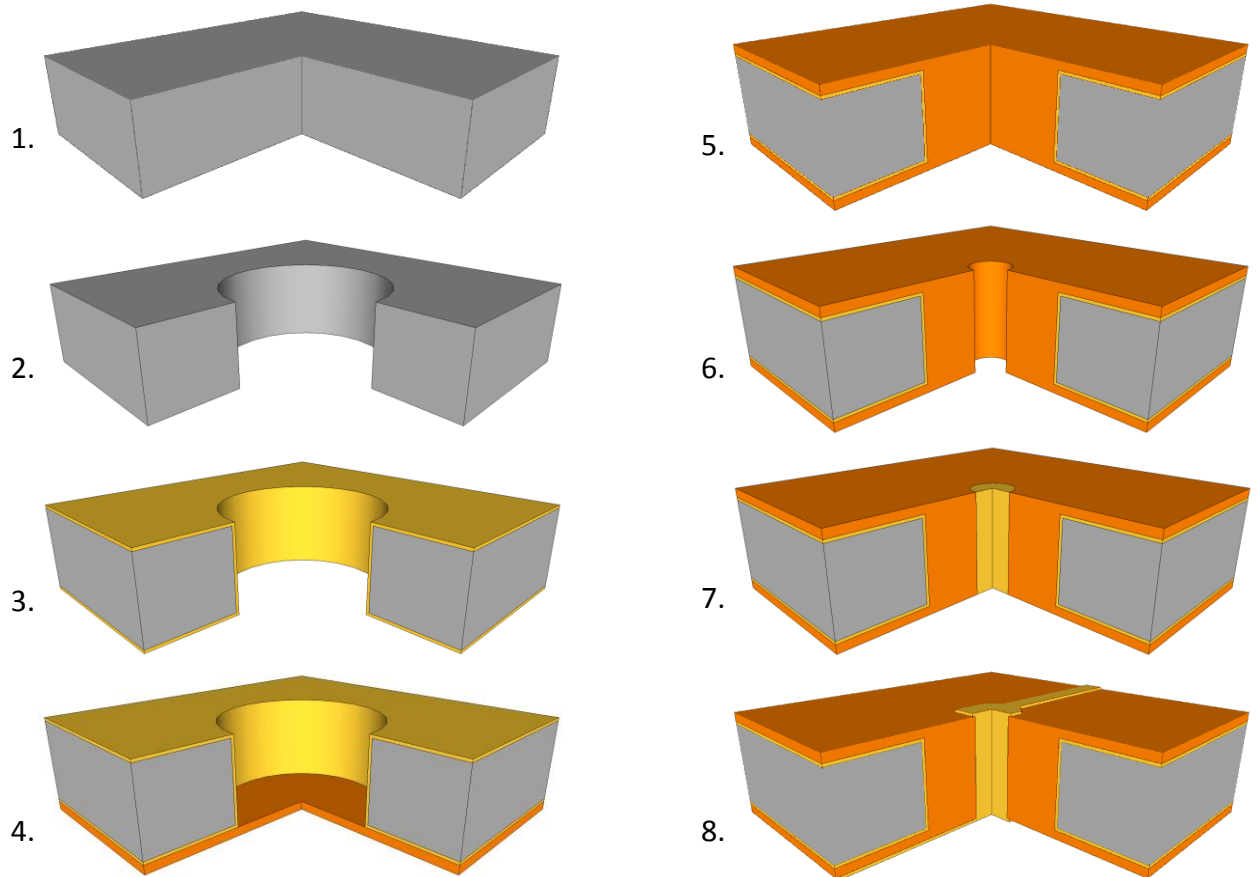


Figure 2-1 : Étapes du procédé de fabrication initial des transitions coaxiales

Le procédé est réalisé sur un substrat de silicium d'épaisseur $150\ \mu\text{m}$ (1), sur lequel l'ouverture cylindrique du coaxial est obtenue par gravure sèche (2). Pour créer les plans de masse, les faces inférieure et supérieure du substrat, ainsi que l'intérieur de la cavité sont ensuite métallisés par pulvérisation d'une couche de titane/or (3). Ensuite un film de résine BCB est reporté sur la face arrière du substrat pour fermer les cavités (4). L'étape suivante consiste à déposer du BCB en face avant du substrat pour remplir les cavités et créer un film diélectrique en face avant. Une optimisation des paramètres de dépôt par spin coating (vitesse, accélération), de la viscosité et des temps de recuit du BCB, nous permettra d'obtenir une bonne planéité en surface (5). L'ouverture du corps central du coaxial est alors obtenue par révélation après photolithographie du BCB ou par gravure sèche (6). Le conducteur central étant ensuite réalisé par une croissance électrolytique d'or (7). Enfin les lignes de propagation (micro-rubans) sont déposées en surface par lift-off (8).

Chaque étape du procédé de réalisation a été développée et adaptée à l'application. Toutes ces étapes sont présentées et détaillées dans les paragraphes suivants. Il faut noter que deux

étapes clés de ce procédé technologique que sont la gravure de la cavité et le remplissage de cette cavité par la résine BCB, ont nécessité de nombreuses étapes d'optimisation.

2.2 Étape 1 : Substrat de départ

Le substrat utilisé est un substrat de silicium haute résistivité d'épaisseur 150 μm . Cette épaisseur de substrat a été convenue lors de la conception du cahier des charges relatif au projet SIPCOM. D'une part, elle permet de travailler sur des substrats de trois pouces de diamètre, polis double faces, commercialisés chez Siltronix. D'autre part, elle permet une réduction de l'encombrement du module final, par minimisation de l'épaisseur de chaque substrat.

La haute résistivité des substrats est utilisée dans le projet SIPCOM pour le système de communication. Elle est de plus inhérente à la commande des substrats chez Siltronix, c'est pourquoi les transitions coaxiales sont réalisées sur des substrats de silicium haute résistivité, mais comme nous l'avons vu précédemment, les performances de la transition ne sont influencées en rien par la nature du substrat.

2.3 Étape 2 : Gravure des cavités

L'étape suivante consiste à graver le substrat de silicium pour créer la cavité de la transition. La gravure du silicium peut se faire de différentes façons.

D'abord par gravure chimique humide, le substrat est plongé dans une solution qui va attaquer chimiquement la surface du substrat non protégée. Ici le substrat de silicium peut être plongé dans un bain d'hydroxyde de potassium (KOH) ou d'hydroxyde de tetramethylammonium (TMAH).

La gravure chimique gazeuse utilise les mêmes principes mais cette fois le substrat est plongé dans une atmosphère gazeuse qui va attaquer la surface du substrat non protégée. Ici le difluorure de xénon (XeF_2) est utilisé comme gaz d'attaque du silicium.

Ces deux méthodes ont l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, et facilement industrialisable. De plus la sélectivité des matériaux est assez bonne et la vitesse de gravure élevée (plusieurs micromètres par minute) ce qui permet de réaliser des gravures profondes. Elles présentent par contre un inconvénient majeur, ce type de gravure chimique est fortement isotrope, ou au mieux la gravure suit les plans cristallins du silicium, ce qui ne convient pas aux profils de gravure en forme de cylindre souhaités pour les transitions coaxiales. Isotropie et anisotropie sont illustrées Figure 2-2.

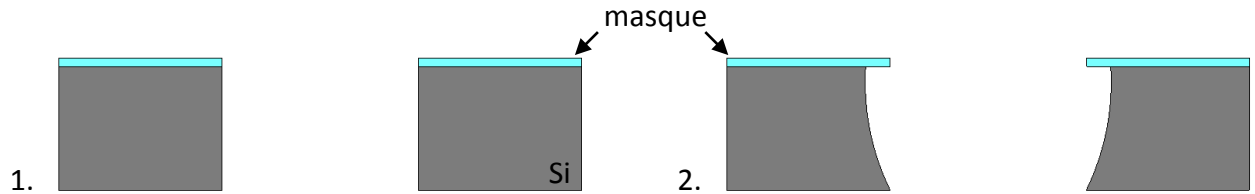


Figure 2-2 : Schéma de gravure (1) anisotrope, (2) isotrope

Le second type de gravure est dit gravure par voie sèche ou gravure physique. Ce type de gravure utilise un mélange de réactions physiques et chimiques pour attaquer le silicium. La génération d'un plasma directionnel envoyé sur le substrat dans une atmosphère gazeuse composée de fluore, ici l'hexafluorure de soufre (SF_6), va permettre d'attaquer le silicium physiquement, par le bombardement d'ions, et chimiquement, par la réaction entre le silicium et le fluore. Le contrôle de la gravure se fait principalement par la vitesse des ions et la quantité de soufre dans l'enceinte. Par un procédé de cyclage entre phases de gravure et phases de passivation (protection), cette méthode permet d'obtenir des flancs à 90° pour des gravures profondes.

Nous avons choisi cette méthode de gravure par voie sèche pour réaliser nos ouvertures. L'IEMN possède un bâti STS, bâti ICP dédié à la gravure profonde de silicium [1]. Ce bâti allie à la fois la technique de gravure par ICP (Inductively Coupled Plasma) et celle par RIE (Reactive Ion Etching).

Il utilise un procédé bien particulier dit « Bosch ». Ce procédé est basé sur l'alternance d'une étape de passivation par le gaz C_4F_8 et d'une étape de gravure par le couple SF_6/O_2 . Cette méthode permet d'obtenir des profils de gravure bien particuliers à savoir une gravure profonde aux flancs droits. Les gravures sont réalisées à basse pression de l'ordre de quelques dizaines de mTorr. Ces vides poussés sont gérés par une pompe turbomoléculaire associée à une pompe primaire à palette. En cycle de gravure, la puissance utilisée pour l'ICP est de 2500W à une fréquence de 13,56MHz. Pour la RIE, la puissance est de 45 W à une fréquence de 380 kHz. La Figure 2-3 présente un schéma du bâti de gravure.

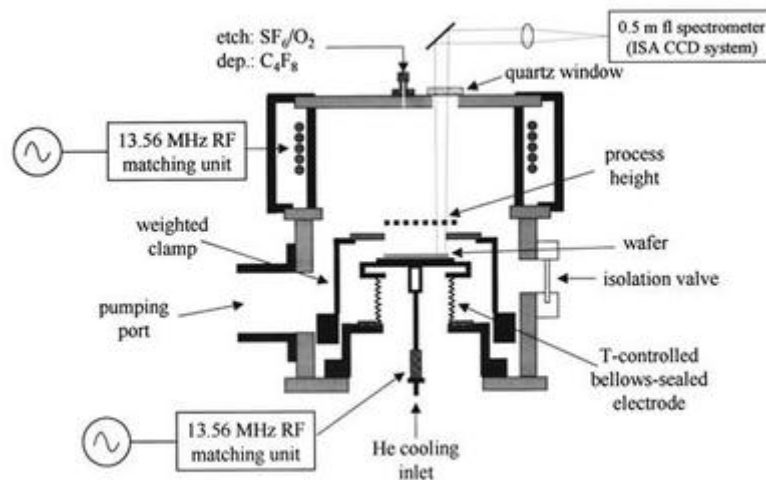


Figure 2-3 : schéma du bâti de gravure silicium ICP-RIE (<http://www.iemn.univ-lille1.fr/fr/les-moyens/centrale-de-technologie/ses-equipements/gravures/gravures-seches-plasmas/gravures-drie-rie.htm>)

Il existe deux types de masque utilisés habituellement pour ces gravures profondes : les « soft masks » et les « hard masks ». Les soft masks correspondent aux masques en résines ou en diélectriques, alors que les hard masks correspondent aux masques en métaux.

Pour ce bâti, seul l'aluminium est autorisé pour les hard masks. Il est toléré du fait de la présence dans la chambre de pièces en aluminium. Pour les gravures profondes, l'aluminium est le plus souvent utilisé comme masque, pour sa résistance au plasma et sa sélectivité par rapport au silicium qui est d'environ 200.

Pour les soft masks, différentes résines peuvent être utilisées, comme l'AZ4562 ou l'AZ9260 de Shipley. Les soft masks doivent avoir une épaisseur suffisante pour tenir durant toute la gravure, car, leur sélectivité par rapport au silicium est de l'ordre de 20.

De plus, lorsque la gravure débouche sur la deuxième face du substrat, il est nécessaire de déposer sur la face arrière une couche d'arrêt pour protéger la cathode. Ainsi lorsque le plasma traverse le substrat, il butte sur la couche d'arrêt et ne détériore pas la cathode.

Les premières gravures que nous avons réalisées utilisaient une couche d'arrêt et un masque en aluminium. Nous avons rencontré quelques problèmes de gravure en utilisant cette méthode, décrits dans les paragraphes suivants.

2.3.1 Silicium noir

Lors de la gravure du silicium, un plasma est généré dans la chambre et la puissance de l'ICP pendant la gravure détermine la vitesse et donc l'énergie cinétique avec laquelle les ions frappent la surface du substrat. Si cette puissance est élevée, l'énergie cinétique des ions est élevée et la gravure est dite très physique. Le plasma vient casser la structure moléculaire en surface du substrat. Le masque en aluminium a la propriété d'être très sélectif avec le silicium pour ce type de gravure, d'où son utilisation comme masque. Mais une énergie trop grande provoque une détérioration du masque, qui crée des brèches à la surface de l'aluminium. Lorsque ces brèches sont trop grandes, le silicium sous le masque commence à être gravé de façon inhomogène. C'est ce que l'on appelle du silicium noir, par la couleur du silicium qu'entraînent les rugosités à la surface. Une fois le masque enlevé, on peut visualiser ces micro-gravures à la surface du substrat. La Figure 2-4 présente ce phénomène.

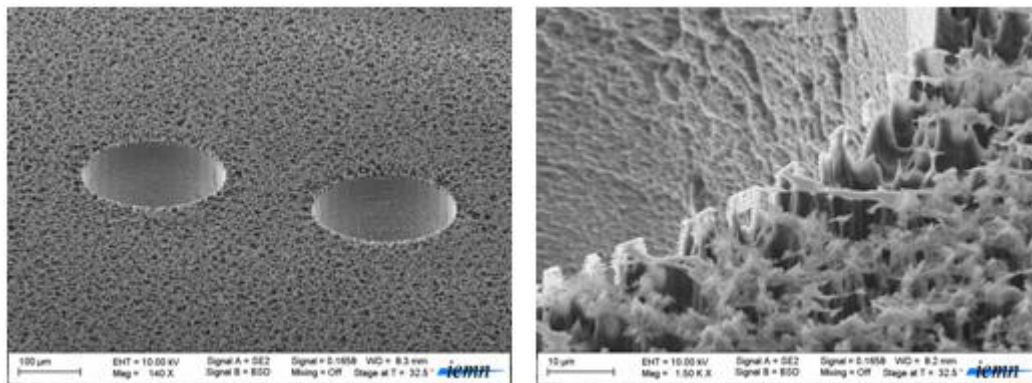


Figure 2-4 : Photos MEB de silicium "noir"

Le moyen d'éviter ce phénomène est de diminuer la puissance du plasma lors de la gravure, entraînant une énergie cinétique plus faible et donc un bombardement d'ions plus doux. Mais cela entraîne une vitesse de gravure moins élevée et une modification de l'angle de gravure, qui devient moins vertical.

2.3.2 Piliers sur le fond de gravure

Lors de la lithographie qui permet de créer les motifs sur le masque d'aluminium, on réalise une gravure de l'aluminium. Si elle n'est pas parfaitement réalisée, cette gravure de l'aluminium laisse quelques résidus sur les motifs. De plus, lors de la gravure du silicium, nous avons vu qu'une puissance de plasma trop élevée entraîne une détérioration du masque d'aluminium et provoque le décollement de particules d'aluminium qui peuvent se redéposer sur les motifs. Ces résidus, de lithographie et de décollement du masque, redéposés sur les motifs, entraînent un masquage non désiré du silicium, ce qui provoque des motifs dans les

motifs, et se traduit par des piliers de silicium dans les cavités. La Figure 2-5 montre ce phénomène.

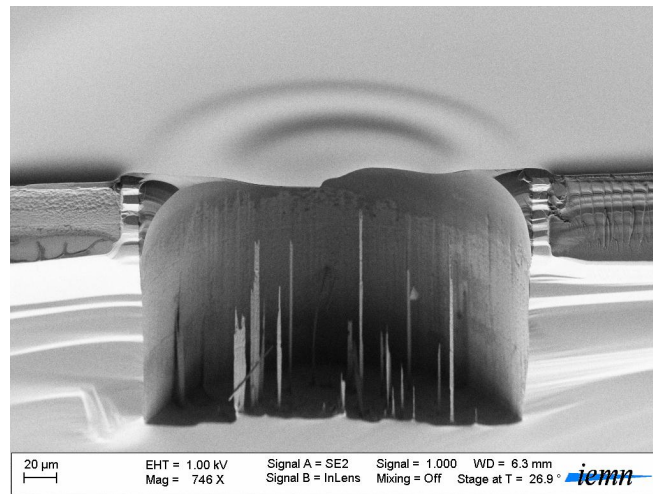


Figure 2-5 : Photo MEB de Piliers présents dans le fond de gravure d'une cavité dans le silicium

2.3.3 Difficultés de contrôle de fin de gravure

Étant donné l'opacité du masque d'aluminium en face arrière, il est impossible de contrôler la fin de gravure par la face arrière du substrat. De plus, avec une couche d'arrêt en aluminium, il est conseillé d'effectuer un collage de l'échantillon sur un substrat support afin d'éviter que le plasma ne perce le substrat et ne détériore l'électrode située sous le substrat. Le contrôle s'effectue donc par la face avant, en essayant de mesurer la profondeur de gravure sans détériorer le masque ou le collage. La méthode habituelle pour déterminer le profondeur de gravure est d'utiliser un profilomètre, qui mesure les reliefs en passant une pointe à la surface de l'échantillon. Ici cette solution n'est pas applicable, la gravure étant trop profonde pour un motif trop étroit, la pointe du profilomètre est trop large pour descendre au fond de la cavité.

Le contrôle se fait donc visuellement, au microscope, en mesurant la distance entre les deux plans focaux du microscope, en surface et au fond des cavités. Mais le focus au fond des cavités n'est pas toujours facile à effectuer, ce qui rend cette méthode peu précise.

En utilisant une couche d'arrêt métallique, ici en aluminium, on peut visualiser un fond de gravure « brillant » lorsque la couche d'arrêt est atteinte. Mais la forme du fond de la cavité est difficile à visualiser à travers la cavité, le contrôle des bords des motifs en face arrière est donc difficile à effectuer.

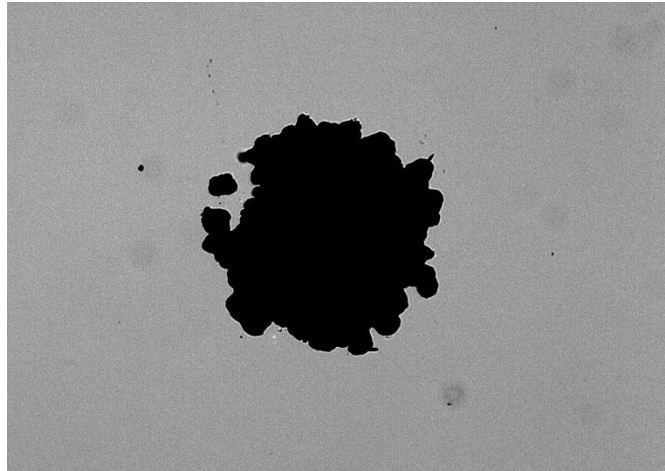


Figure 2-6 : Photo au microscope électronique de la face arrière d'une cavité débouchée dans le silicium, dont la fin de gravure a été mal contrôlée

2.3.4 Couche d'arrêt transpercée

Comme nous venons de l'expliquer, le contrôle de fin de gravure est difficile à effectuer et donc la fin de gravure difficile à déterminer. Lorsque la gravure est trop longue, il arrive que la puissance du plasma soit suffisante pour attaquer la couche d'arrêt et provoquer une détérioration de celle-ci, allant jusqu'à la transpercer dans certains cas (Figure 2-6).

2.3.5 Modification du procédé, utilisation d'un masque en SPR220

Lors des recherches pour optimiser le masque pour la gravure du silicium, nous avons trouvé des références sur une résine développée par Megaposit, qui a la propriété de résister aux plasmas de façon plus efficace que la plupart des résines optiques habituelles, la SPR 220. Nous avons développé un procédé de lithographie pour optimiser l'adhésion et la lithographie de cette résine, ainsi que sa tenue aux plasmas. Les résultats ont été excellents avec une tenue efficace du masque de résine durant la gravure profonde du silicium et une nette amélioration de la définition des motifs, et ce en gardant des paramètres de gravure permettant d'obtenir des flancs de cavité à 90° et une vitesse de gravure de l'ordre de 6 $\mu\text{m}/\text{min}$. De plus, en utilisant cette résine comme couche d'arrêt en face arrière du substrat, le contrôle de fin de gravure devient enfantin grâce à la transparence de la résine. Un simple contrôle visuel au microscope optique permet de déterminer la forme des motifs en face arrière et de décider de la fin de gravure.

Depuis, cette résine a été utilisée pour de nombreux procédés de gravure profonde au sein de l'IEMN et a permis la réalisation de structures à très fort rapport d'aspect et/ou très profondes. La Figure 2-7 présente une cavité, vue de coupe, gravée avec ce procédé.

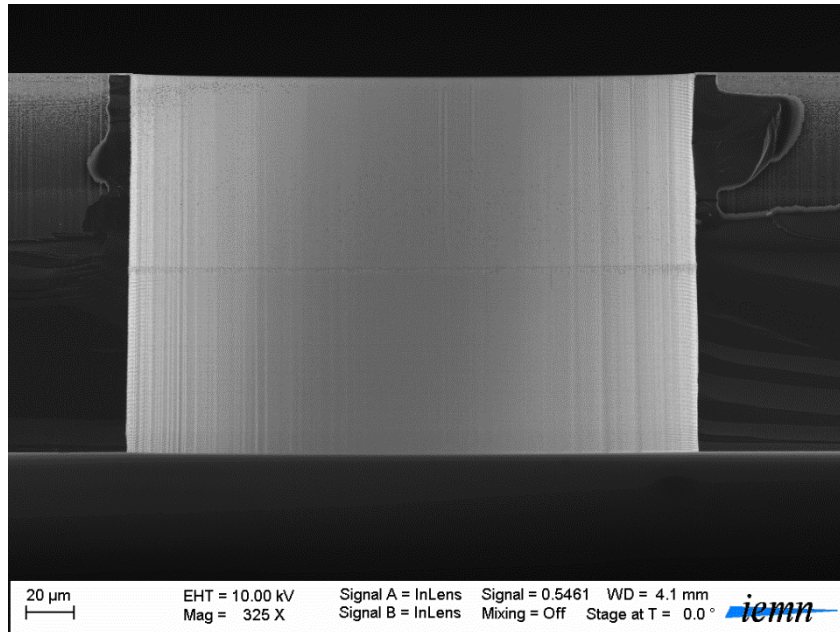


Figure 2-7 : Photo MEB de la coupe d'une cavité gravée dans le silicium, réalisée par le procédé SPR220

2.3.6 Dissolution du C_4F_8

Nous avons expliqué que pour ce procédé de gravure « Bosch », le principe est d'utiliser un cyclage entre phase de gravure et phase de passivation. Cette passivation est en réalité un dépôt homogène d'octafluorobutène (C_4F_8) qui a pour but de protéger les flancs de gravure. En effet, lors de la gravure, le plasma bombarde les surfaces « horizontales », c'est-à-dire orthogonales à sa direction. Mais le bombardement du fond du motif provoque une réflexion du plasma vers les flancs de la cavité, qui sont détériorés. Sans passivation, la gravure serait pseudo isotrope. Le dépôt de C_4F_8 est suffisant pour protéger le flanc de la cavité des réflexions du plasma durant un cycle. Par contre le fond du motif, orthogonal à la direction du plasma, subit toute la puissance du bombardement et la couche de passivation au fond de la cavité est immédiatement détruite pour continuer la gravure sur ce cycle.

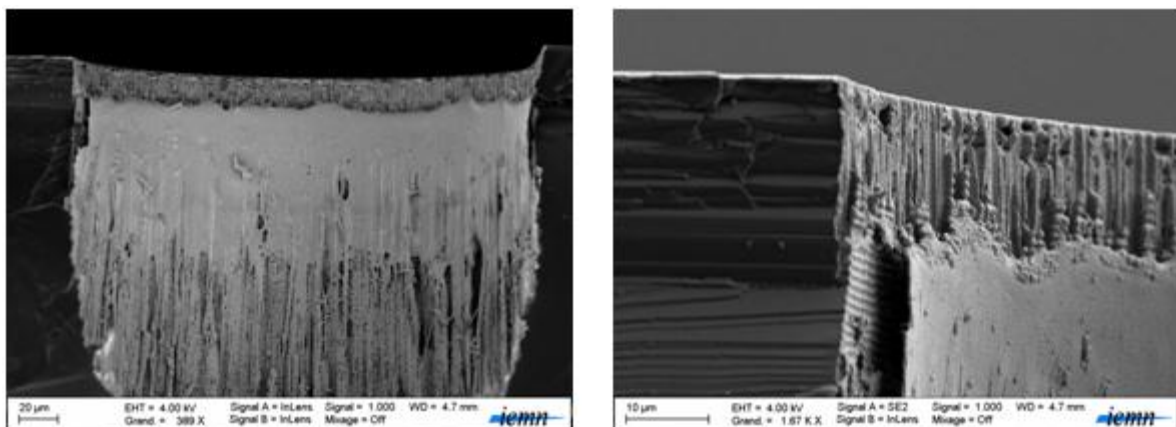


Figure 2-8 : Photos MEB de flancs de cavités couverts de C_4F_8

Après gravure, il est nécessaire d'éliminer la couche de passivation toujours présente sur les flancs de gravure. Pour cela, on réalise un nettoyage du silicium par une attaque plasma oxygénée (plasma O₂) omnidirectionnelle, qui a pour intérêt de graver par la même occasion les résidus de résine SPR 220 qui restent sur l'échantillon après nettoyage du masque.

2.4 ETAPE 3 : Métallisation des plans de masse

L'étape suivante consiste à métalliser le substrat pour créer les plans de masse de la transition et des structures de propagation en surface. Les plans de masses sont en or. L'accroche entre l'or et le silicium n'étant pas optimale, une couche d'accroche en titane est préalablement déposée sur le silicium pour améliorer la solidité du système. Le bicouche titane/or est déposé par pulvérisation cathodique.

La pulvérisation cathodique utilise la génération d'un plasma froid pour déposer des métaux sur une surface [2]. L'application d'une différence de potentiel entre la cible (le métal) et les parois du réacteur au sein d'une atmosphère raréfiée permet la création d'un plasma froid. Sous l'effet du champ électrique, les espèces positives du plasma se trouvent attirées par la cathode (cible) et entrent en collision avec cette dernière. Elles communiquent alors leur quantité de mouvement, provoquant ainsi la pulvérisation des atomes sous forme de particules neutres qui se condensent sur le substrat. Ce procédé est illustré Figure 2-9. La formation du film s'effectue selon plusieurs mécanismes qui dépendent des forces d'interactions entre le substrat et le film.

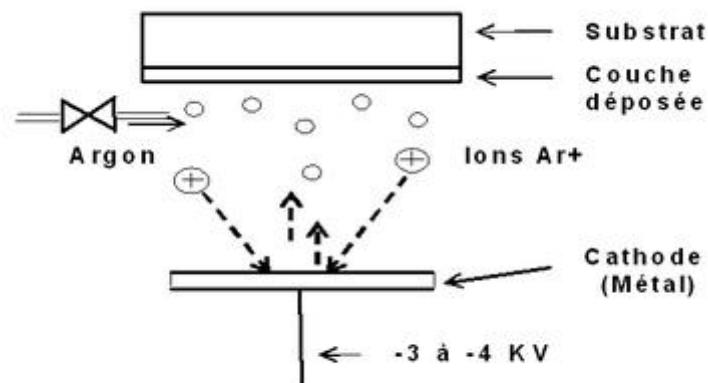


Figure 2-9 : Schéma de principe du procédé de pulvérisation cathodique

Les recettes utilisées pour ces dépôts sont les suivantes :

- Pulvérisation de titane : sur la cible de titane, la puissance appliquée au générateur RF est de 250 W, avec un flux d'argon de 30 sccm dans la chambre, pendant 45 secondes, ce qui crée un film de titane de 20 nm sur la surface du substrat. L'épaisseur du film de titane sur les flancs de la cavité est de 8 nm.

- Pulvérisation d'or : sur la cible d'or, la puissance appliquée au générateur RF est de 250 W, avec un flux d'argon de 30 sccm dans la chambre, pendant 750 secondes, ce qui crée un film d'or de 1 μm sur la surface du substrat. Lors de dépôts trop longs, le plasma chauffe l'enceinte de la chambre ce qui d'une part perturbe le dépôt, et d'autre part détériore la cible. Pour réduire ce réchauffement, le dépôt est cyclé. Trois cycles de 330 secondes sont effectués, avec un temps de repos de deux minutes entre chaque dépôt. L'épaisseur du film d'or sur les flancs de la cavité est de 300 nm.

Pour certifier un bon contact métallique et une épaisseur d'or suffisante sur les flancs de la cavité, le dépôt est doublé, une fois par la face avant du substrat, puis par la face arrière du substrat

Lors de cette étape de métallisation, nous avons rencontré un problème d'uniformité de la couche métallique sur les flancs de la cavité, dû à la rugosité de surface du silicium. Ce problème est expliqué dans le paragraphe suivant.

2.4.1 Lissage du scalloping

Durant un cycle de gravure du silicium, le flanc de cavité obtenue par gravure sèche n'est pas protégé, il sera protégé après le cycle de passivation suivant. La gravure est alors pseudo isotrope. La succession de ces cycles entraîne un phénomène de « scalloping ». C'est-à-dire que l'on retrouve cette gravure isotrope par cycle sur les flancs, ce qui se traduit par des rainures sur les flancs de la cavité, une rainure correspondant à un cycle de gravure. La Figure 2-10 présente ce phénomène.

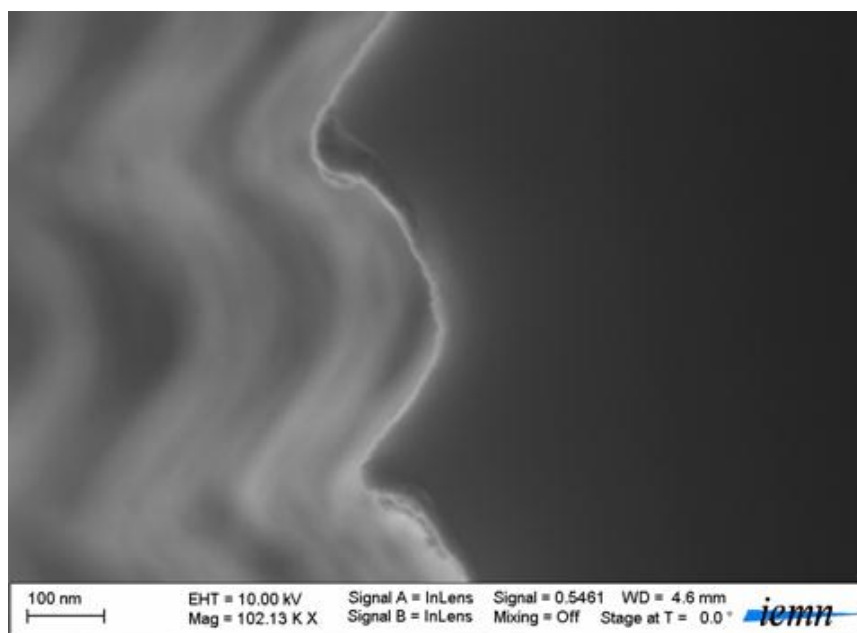


Figure 2-10 : Photo MEB du phénomène de scalloping sur le flanc des cavités silicium

Le phénomène de scalloping crée de la rugosité sur les flancs de la cavité. Les transitions coaxiales utilisent un plan de masse cylindrique qui est déposé sur les flancs de la cavité. Or de par la rugosité, le contact métallique n'est pas toujours homogène sur toute l'épaisseur du substrat. La Figure 2-11 montre un problème de continuité du plan métallique sur les flancs.

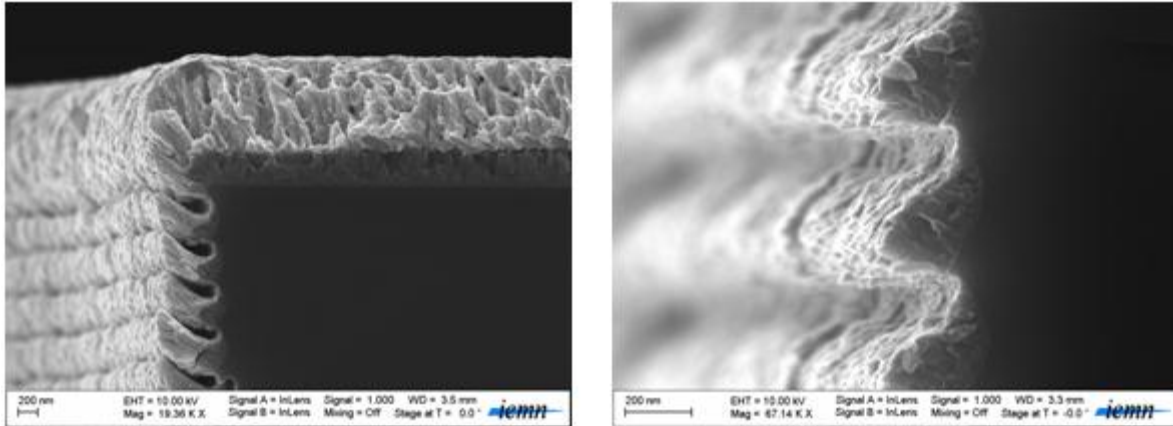


Figure 2-11 : Photo MEB de problèmes de métallisation dus au scalloping

Il a été nécessaire de réduire cette rugosité pour améliorer le contact métallique. C'est l'étape de lissage des flancs de la cavité. Pour cela, il faut polir les pointes créées par le scalloping. Une méthode généralement utilisée pour y parvenir est d'oxyder l'échantillon dans un four LPCVD puis de le désoxyder chimiquement. L'oxydation se faisant sur une épaisseur définie en surface du silicium (ici 200 nm), les pointes de silicium seront plus touchées que les creux, ce qui après désoxydation produira un effet de lissage. La désoxydation se réalise dans un bain d'acide fluoridrique (HF).

Grace à cette étape de lissage, la métallisation des flancs de la cavité est continue et homogène sur toute l'épaisseur du substrat. Les figures suivantes présentent des comparaisons des flancs de la cavité avant et après lissage.

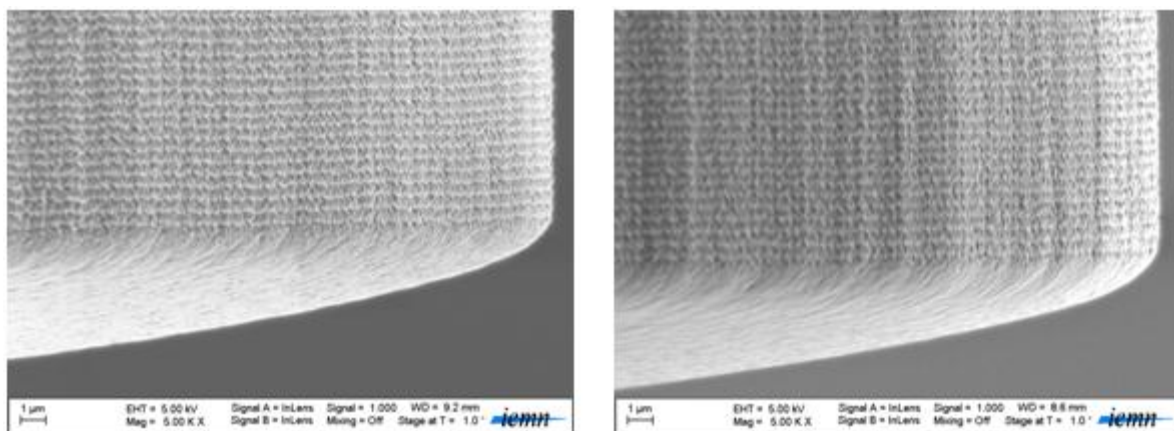


Figure 2-12 : Comparaison des flancs avant lissage (à gauche) et après lissage (à droite)

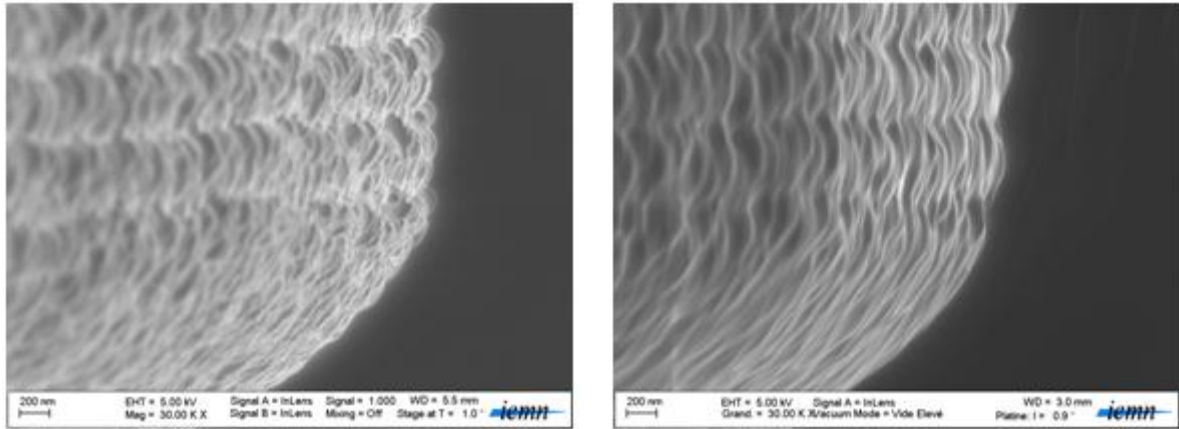


Figure 2-13 : Zoom sur le fond de gravure

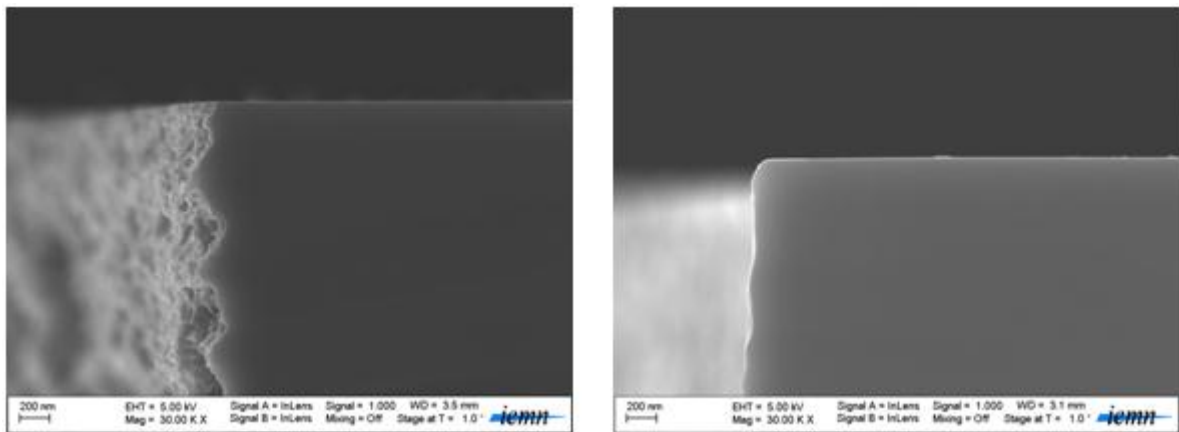


Figure 2-14 : Zoom sur le flanc de cavité en surface

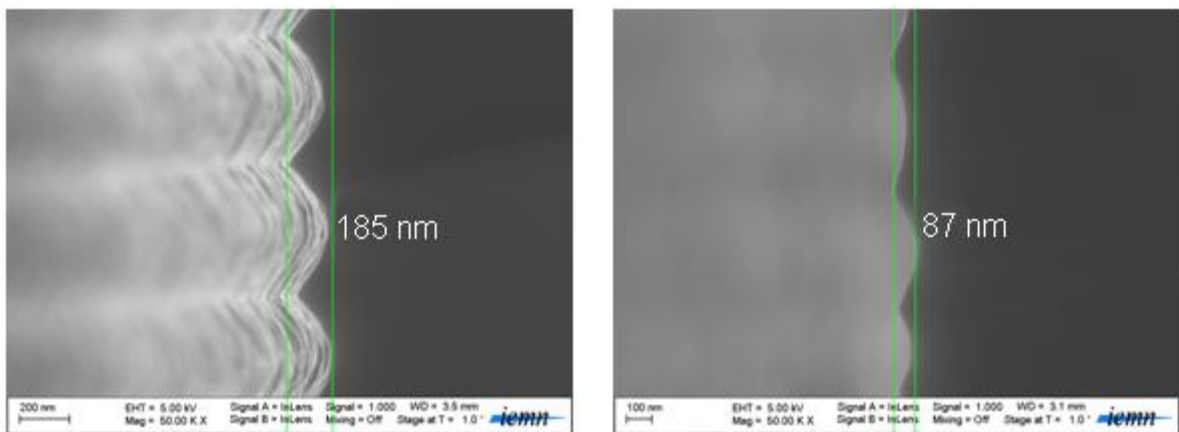


Figure 2-15 : Mesure MEB de la différence du scalloping avant lissage (à gauche) et après lissage (à droite)

La Figure 2-16 montre un zoom sur le fond de la cavité, présentant cette métallisation. On observe que le dépôt de métal est homogène, sans aspérité. L'épaisseur mesurée en bas de flanc de cavité est de 300 nm.

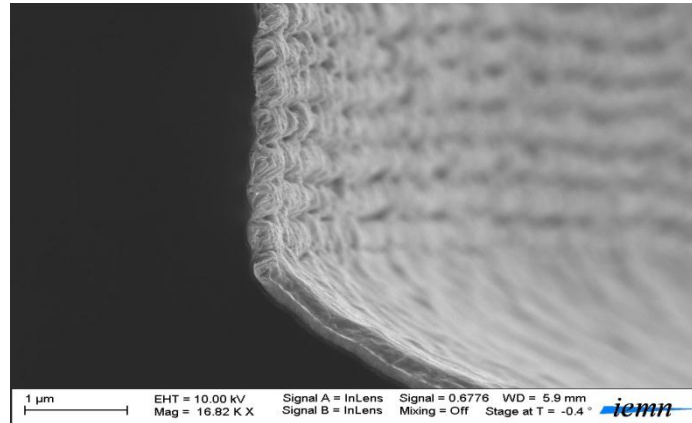


Figure 2-16 : Photo MEB de la métallisation des flancs dans le fond de la cavité

2.5 Étapes 4 et 5 : Report du film de BCB en face arrière et dépôt du BCB dans les cavités

L'étape qui suit consiste à remplir les cavités de diélectrique. Le diélectrique utilisé est du benzocyclobutène (BCB). Le BCB se présente sous forme de résine liquide, de viscosité bien définie, et est habituellement déposé par spin coating.

Cette étape représente un important verrou technologique. Plusieurs points critiques doivent être résolus :

- Collage du substrat sur BCB
- Remplissage des cavités
- Homogénéité volumique du BCB dans les cavités
- Uniformité de surface

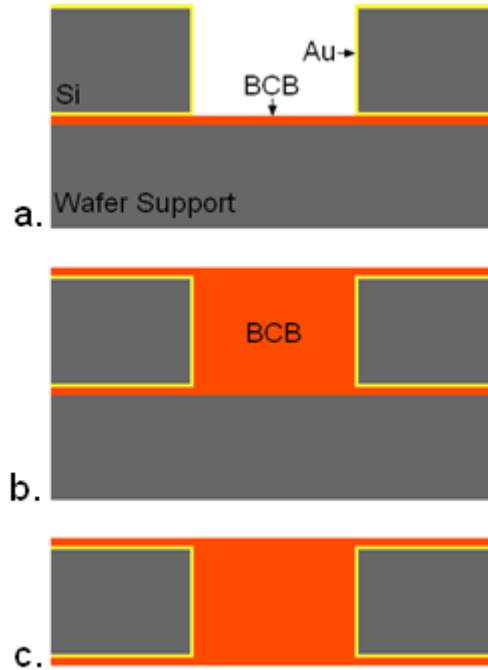


Figure 2-17 : Étapes du report du film de BCB en face arrière et dépôt de BCB dans les cavités

Le report du film de BCB se déroule de la façon suivante :

- Collage du substrat sur un substrat support, par un film de BCB. Ce collage s'effectue grâce à une machine de scellement de substrat, la SB6e de SussMicrotec. Durant cette étape, la couche de BCB de scellement est polymérisée à 250°C.
- Le BCB est déposé dans les cavités par spin coating. Plusieurs dépôts sont nécessaires pour remplir le volume des cavités. En jouant sur la viscosité du BCB et sur l'allure du recuit intermédiaire entre chaque dépôt, il est possible d'optimiser le remplissage des cavités.
- La dernière étape consiste à décoller le substrat support en laissant le film de scellement de BCB sur l'échantillon. L'épaisseur de BCB pour le scellement est étudiée pour qu'après décollage il reste un film de BCB de 12µm en surface de l'échantillon.

Cette étape représente un important verrou technologique. Plusieurs points critiques doivent être résolus :

- Collage du substrat sur BCB
- Remplissage des cavités
- Homogénéité volumique du BCB dans les cavités
- Uniformité de surface

Nous avons effectué de nombreux développements technologiques pour réaliser cette étape.

Tout d'abord nous avons cherché comment réussir à remplir les cavités de BCB. En effet, lors des premiers essais, nous avons effectué des dépôts par spin coating. Il s'est avéré que le dépôt de BCB ne rentrait pas dans les cavités mais un film se formait en surface, avec des dépôts inhomogènes de BCB au fond des cavités. En travaillant d'abord sur les paramètres de la tournette, puis sur le type de BCB utilisé, nous avons réussi à créer un dépôt relativement homogène au fond des cavités. Il s'en est suivi des essais de multi dépôts, pour réussir à combler les cavités. Plusieurs problèmes sont apparus alors, présentés Figure 2-18.



Figure 2-18 : Problèmes liés au dépôt de BCB (a) Bulles d'air et (b) inhomogénéité

- a) Le multi dépôt crée un volume de BCB inhomogène, dû à la présence de bulles d'air piégées lors du dépôt de deux couches successives, ou bulles créées par l'évaporation des solvants lors du recuit final.
- b) Le multi dépôt crée, à chaque dépôt, une épaisseur de BCB en surface non négligeable. Avec la succession de 5 ou 6 dépôts, nécessaire à combler les cavités, il se crée à la surface une irrégularité importante au bord des cavités.

De nombreuses études ont permis d'optimiser les paramètres du dépôt, afin d'obtenir une étape optimale. La viscosité du BCB a été étudiée, les paramètres de spin coating ont été optimisés, avec un cycle de dépôt à plusieurs étapes, les paramètres de recuit entre chaque dépôt de couche ont été révisés, ainsi que le recuit final pour la polymérisation complète du BCB. Tous ces paramètres, optimisés, sont présentés Tableau 2-1.

Paramètres	Valeurs
Volume de BCB dispensé	3 mL
Accélération (étape 1)	100 t/m/s
Vitesse de rotation (étape 1)	500 t/ m
Temps de rotation	30 sec
Accélération (étape 2)	1000 t/m/s
Vitesse de rotation (étape 2)	2000 t/m
Temps de rotation	30 sec

Tableau 2-1 : Paramètres de dépôt du BCB par spin coating sur un substrat de 3 pouces

La dernière phase de cette étape est le décollage du substrat support. Là aussi nous avons rencontré un problème, présenté Figure 2-19.

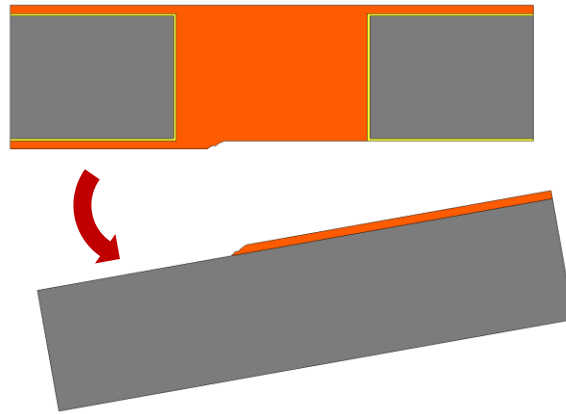


Figure 2-19 : Problème au décollage du substrat d'accueil

Lors du décollage du substrat support, le film de BCB de scellement doit rester sur l'échantillon. Sans traitement préalable, le film craque et certaines parties restent sur l'échantillon tandis que d'autres partent avec le support. En effet, la force d'accroche entre l'or et le BCB est très faible, il est donc nécessaire d'utiliser une couche intermédiaire. Un dépôt de résine AP3000 est effectué sur l'or avant le dépôt de BCB, il servira à améliorer l'accroche entre ces deux couches.

De plus, dans ce cas précis, il est nécessaire de réduire la force d'accroche entre le BCB et le silicium du substrat support, ce qui favorise l'accroche du BCB à l'or en dépit du silicium du substrat support lors du décollage de celui-ci. Insérer une couche intermédiaire entre le BCB et le silicium permet de réduire cette force d'accroche. Il s'agit ici d'une couche dite "non adhésive". Cette technique a été développée à l'IEMN par Kim Janggil [3]. Une couche non adhésive de SAM est déposée sur le substrat support de silicium avant le dépôt du film de BCB. La Figure 2-20 illustre ce procédé, pour des capots en BCB. Le même procédé peut être utilisé pour cette étape de report d'un film complet de BCB.

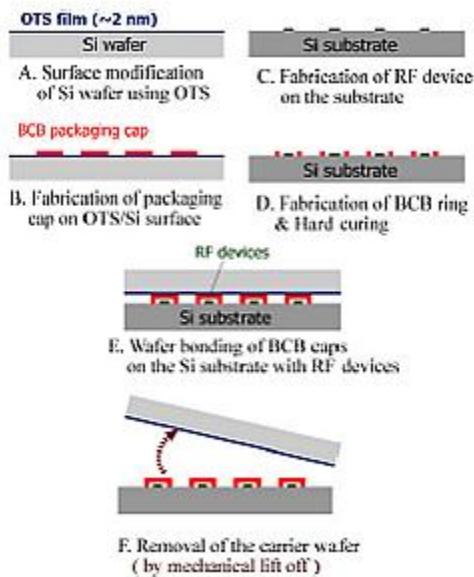


Figure 2-20 : Schéma de principe du procédé de report de capots de BCB utilisant une couche non adhésive de SAM

2.6 Étape 6 : Gravure du BCB

L'étape suivante permet de créer l'âme centrale de la transition coaxiale. Pour cela, le BCB doit être gravé sur l'épaisseur complète de façon quasi anisotrope, c'est-à-dire de façon rectiligne (cf Figure 2-21). La gravure chimique humide du BCB est quasi impossible, aucun produit ne parvient à attaquer le BCB lorsque celui-ci est polymérisé entièrement. Les moyens de gravure restant sont la lithographie optique et la gravure sèche.

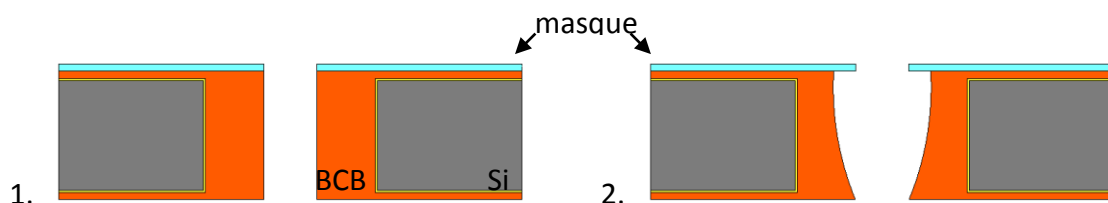


Figure 2-21 : Différence entre les gravures du BCB (a) anisotrope et (b) isotrope

Certains types de BCB sont photosensibles, ce qui permet de créer des motifs dans la couche de BCB par rayonnement aux UV. Malgré de nombreux développements du procédé de lithographie du BCB, il persiste un problème sur la précision des motifs. En effet, les flancs des motifs de BCB photosensible définis par lithographie optique présentent un angle aux alentours de 60° , voire plus bas lors de la révélation de grandes épaisseurs de BCB, comme illustré Figure 2-22. Cette résolution est beaucoup trop basse pour notre application. Les transitions coaxiales doivent avoir une âme centrale cylindrique ou quasi cylindrique.

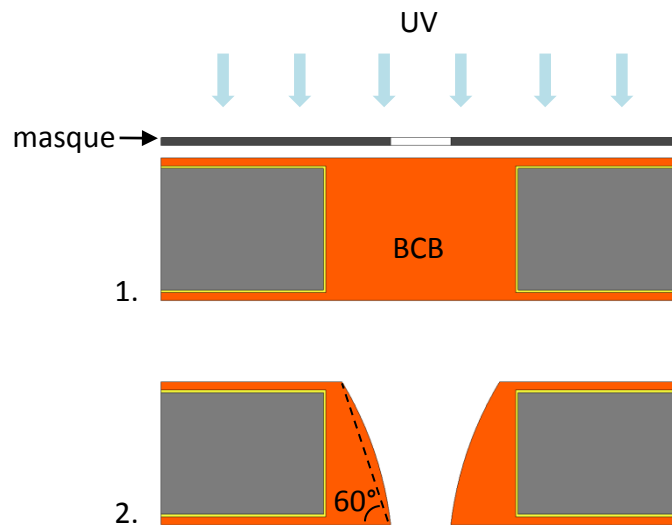


Figure 2-22 : Insolation (1) et Développement (2) du BCB photosensible

La gravure du BCB par voie sèche a également fait l'étude de nombreux travaux. On retrouve dans la littérature des études sur les types de gaz à utiliser, la puissance de plasma optimale, le type de masque à utiliser [4-8].

Malgré ces études, le BCB reste un matériau très difficile à graver. Même dans les conditions optimales, la vitesse de gravure est inférieure à 1 $\mu\text{m}/\text{min}$. La résistance du BCB au plasma est si élevée qu'il est difficile de trouver un matériau permettant de créer un masque d'une épaisseur suffisante pour la gravure profonde du BCB.

Plusieurs matériaux ont été étudiés pour servir de masque de gravure : l'aluminium, le chrome, la SPR220, la résine AZ40XT. Dans les conditions optimales de gravure du BCB, la sélectivité de ces matériaux par rapport au BCB est donnée dans le Tableau 2-2, ainsi que l'épaisseur nécessaire pour la gravure de 150 μm de BCB, comme désiré dans le procédé de fabrication des transitions coaxiales.

Matériau	Sélectivité par rapport au BCB	Épaisseur nécessaire pour 150 μm de BCB
SPR220	10	15 μm
AZ40XT	1	150 μm
Aluminium	>100	1,5 μm
chrome	>100	1,5 μm

Tableau 2-2 : Propriétés en gravure sèche du BCB et des différents matériaux de masquage étudiés

L'aluminium garde une bonne sélectivité par rapport au BCB ce qui signifie que pour graver 150 μm de BCB, il est nécessaire d'avoir un masque d'aluminium de 1,5 μm d'épaisseur.

On constate que les épaisseurs de matériaux utilisables comme masque sont trop importantes pour être réalisées en un seul dépôt, ou que le procédé serait trop consommateur de ces matériaux. Nous avons étudié la possibilité d'une gravure en plusieurs étapes, par couches "fines", pour ainsi avoir la possibilité de redéposer un matériau de masquage entre chaque gravure, mais cette solution semble trop difficile à mettre en place étant donnée la profondeur de gravure. Cette étape est restée un verrou technologique que nous ne savons résoudre actuellement.

Étant donnée le verrou impliqué par cette gravure, le procédé de réalisation technologique doit être modifié pour pallier ce problème. Un nouveau procédé a été développé, suite à nos étapes d'optimisation réalisées lors de ce premier procédé technologique, permettant de contourner cette difficulté.

3 Procédé de réalisation technologique modifié

Pour pallier le verrou technologique de gravure profonde du BCB par voie sèche, nous avons développé un deuxième procédé de réalisation permettant de contourner cette étape. Ce nouveau procédé est présenté Figure 3-1.

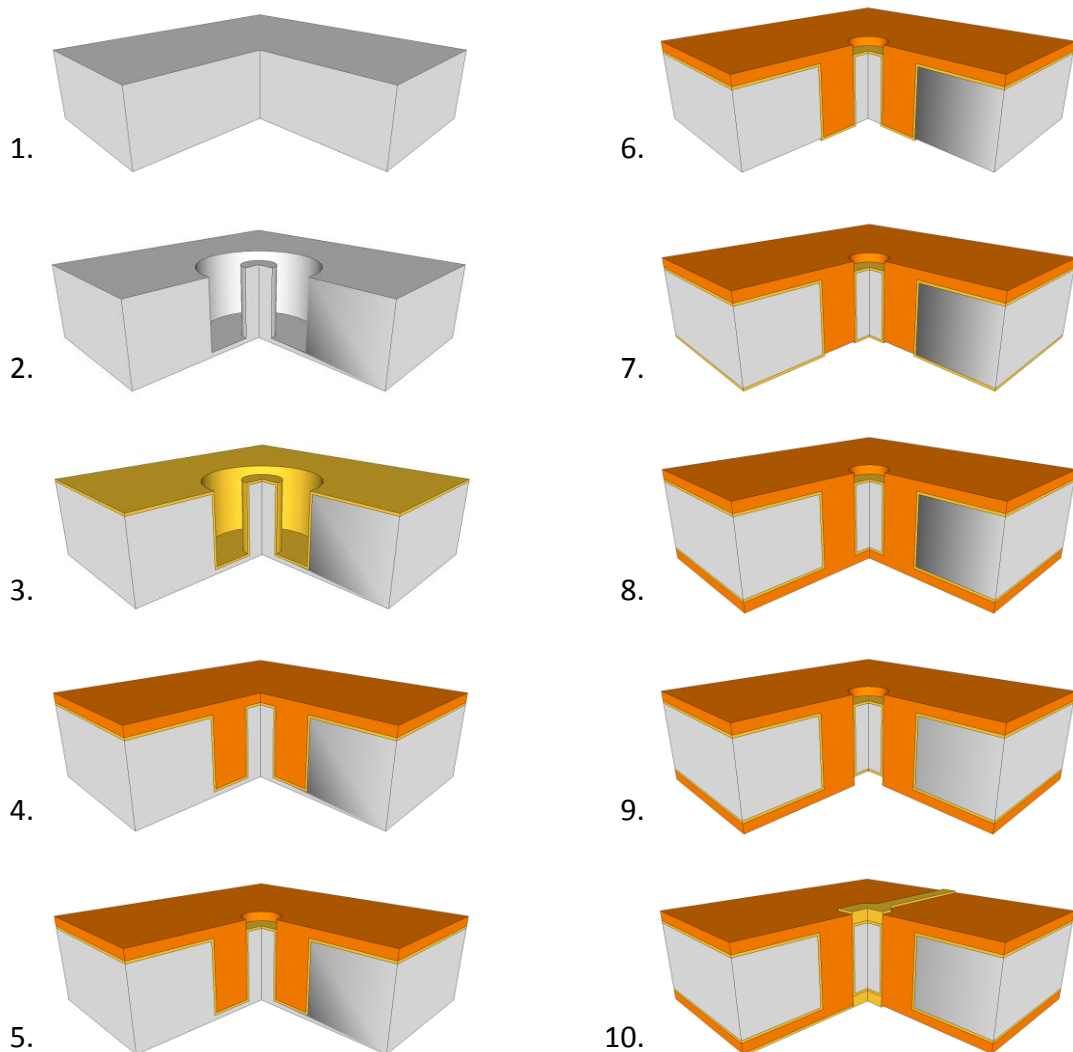


Figure 3-1 : Procédé de réalisation technologique modifié

Pour éviter l'étape de gravure du BCB, nous avons basé le procédé sur le principe du moule. Ce procédé avait été évoqué comme procédé de base, mais l'étape de remplissage des cavités par du BCB semblait très difficile à réaliser. La présence des piliers, utilisés dans ce procédé pour servir de moule pour l'âme centrale de la transition coaxiale, provoquait une difficulté supplémentaire pour cette étape de remplissage.

Les études menées sur la manipulation du BCB (étape 5 du procédé), le développement technologique du remplissage des cavités, nous ont permis de passer ce verrou. Nous avons donc pu modifier le procédé pour pallier le problème de gravure sèche du BCB.

Les étapes du nouveau procédé technologique sont détaillées dans les paragraphes suivants.

3.1 Étape 1 : Substrat de départ

Le substrat est le même que pour le procédé précédent. L'épaisseur est de 150 μm . Ici l'épaisseur du substrat doit être mesurée très précisément avant chaque run. En effet nous verrons dans le paragraphe suivant que la profondeur de gravure est très importante, et notamment que l'épaisseur de silicium restante dans le fond de gravure doit être connue.

3.2 Étape 2 : Gravure des cavités

Cette étape est quasiment identique à celle utilisée dans le procédé précédent. La différence se trouve dans le fait que cette fois, en plus du pilier central présent au centre de la cavité, le substrat n'est pas percé, la gravure reste non débouchante, ceci pour le maintien du pilier central. De ce fait il est inutile d'utiliser une couche d'arrêt en face arrière du substrat.

Les paramètres de gravure restent les mêmes. Cette fois la profondeur de gravure est contrôlée très précisément. La vitesse de gravure est connue, et très précise. Elle est de plus réévaluée à chaque run. Pour cela la gravure est réalisée en trois fois, ce qui permet de sortir l'échantillon, mesurer la profondeur de gravure effectuée, et réévaluer de manière très exacte la vitesse de gravure. De cette manière, il est tout à fait faisable de contrôler l'épaisseur exacte du fond de gravure.

La Figure 3-2 présente une cavité gravée dans le silicium, en utilisant cette méthodologie de gravure. Le pilier central est visible, il servira de moule pour l'âme centrale de la transition coaxiale. La Figure 3-3 présente des zooms sur les détails de cette gravure, indiquant les mesures qui ont été faites. On peut voir que le fond de gravure est légèrement bombé, ce qui crée une différence de niveau entre le bord de la cavité et le centre. Cette différence sera rattrapée lors des étapes finales. On note les stries présentes sur les flancs de gravure ainsi que la rugosité très faible sur le fond de gravure.

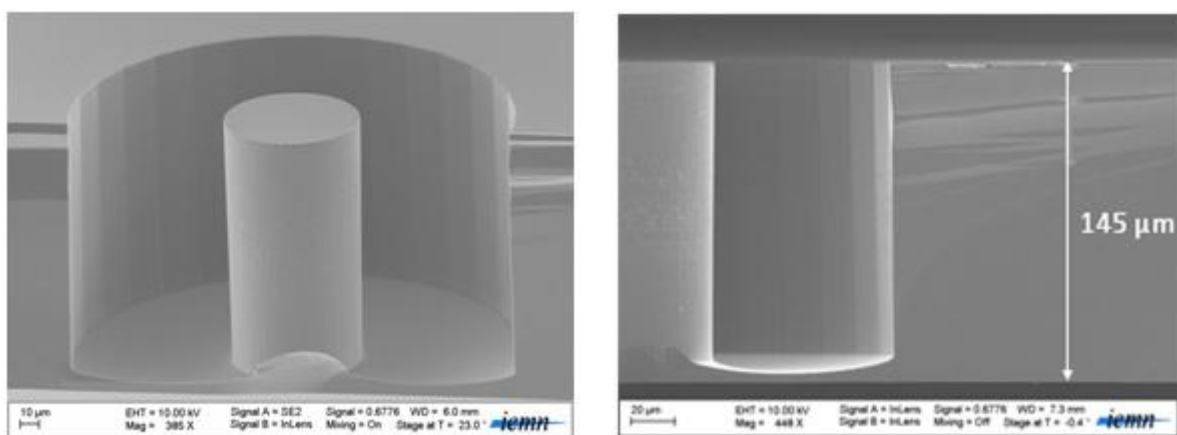


Figure 3-2 : Photos MEB d'un pilier gravé dans le silicium (à gauche) et vue de la tranche (à droite)

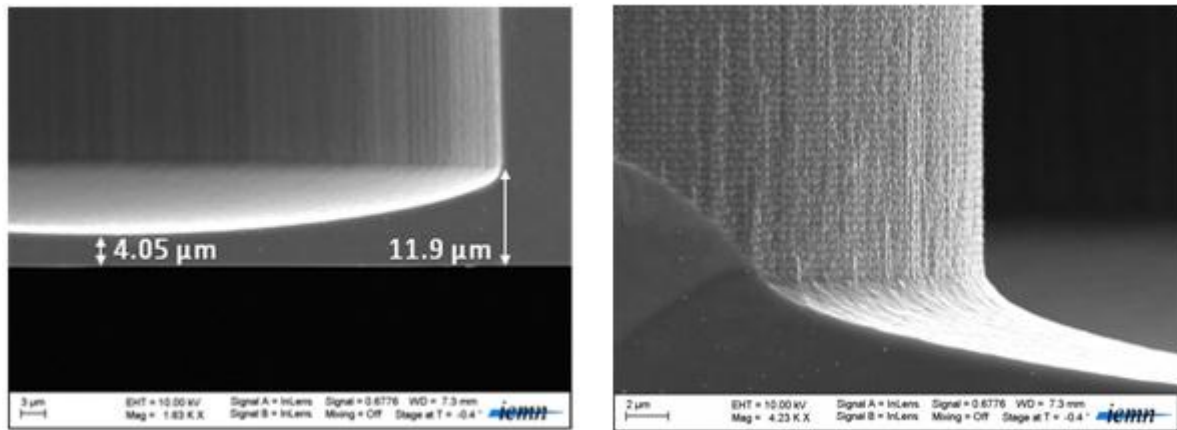


Figure 3-3 : Photos MEB du fond de la cavité (à gauche) et zoom sur la rugosité de surface du pilier (à droite)

3.3 Étape 3 : Métallisation des plans de masse

Cette étape est relativement similaire à celle du procédé précédent, mais la pulvérisation des plans de masse se fait cette fois ci par un seul côté du substrat. La métallisation définit à la fois les plans de masse en face avant du substrat et sur les flancs de la cavité, mais aussi l'âme centrale de la transition. De plus, plan de masse et âme centrale sont court-circuités par le métal qui se dépose au fond de la cavité. Il sera donc nécessaire de graver cette métallisation pour ôter ce court-circuit lors des étapes finales.

La Figure 3-4 (gauche) présente la métallisation du flanc au fond de la cavité. On note une bonne homogénéité du dépôt et une épaisseur mesurée de 300 nm d'or sur le flanc pour 1 μm déposé en surface. La Figure 3-4 (droite) montre une analyse EDX de cette même image, différenciant les matériaux. On note la présence comme souhaité d'une couche de titane, servant de couche d'accroche entre l'or et le silicium.

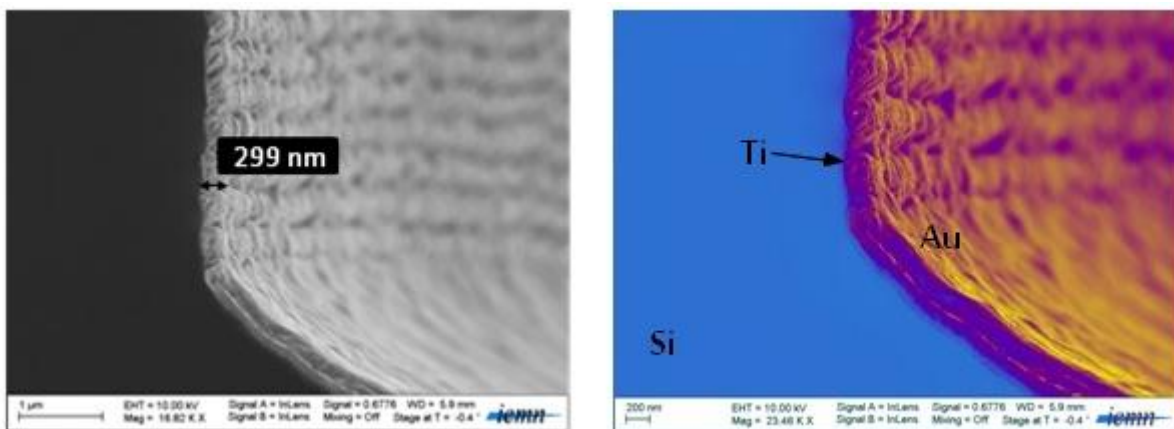


Figure 3-4 : Photos MEB de la métallisation des flancs au fond de la cavité (à gauche) et analyse EDX des matériaux (à droite)

3.4 Étape 4 : Dépôt de BCB

Dans ce nouveau procédé, les cavités étant fermées, l'étape de report sur un substrat support avec une couche de BCB n'est plus nécessaire. Seul le multi dépôts en face avant est réalisé. Étant donnée la présence des piliers centraux dans les cavités, les paramètres de dépôt, notamment au niveau des profils de vitesses de rotation, ont dû être revus et corrigés. Néanmoins cette étape reste significativement similaire à celle du procédé précédent.

Les figures suivantes présentent les dépôts successifs du BCB dans la cavité.

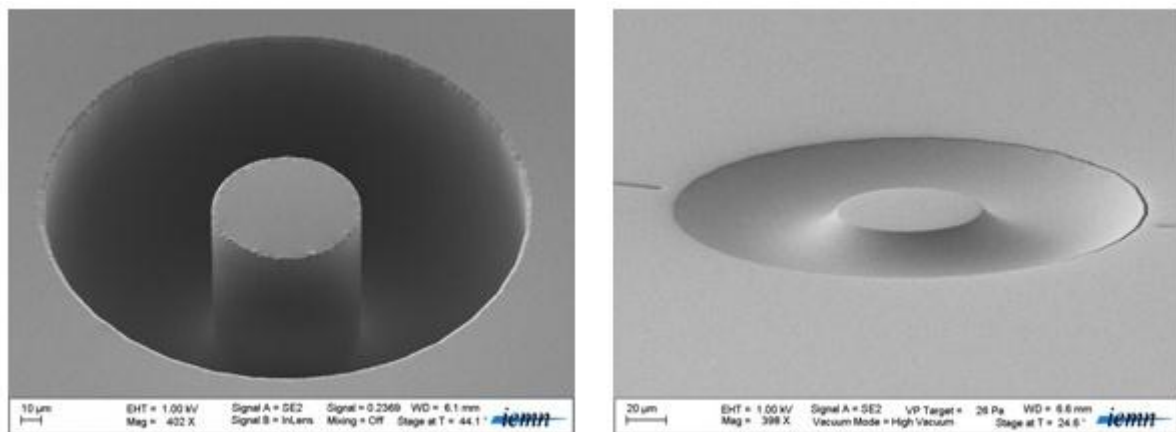


Figure 3-5 : Photos MEB vues de dessus de la cavité après un dépôt de BCB (à gauche) puis deux dépôts (à droite)

De même les figures suivantes présentent les différentes étapes du remplissage, vues de trois quarts.

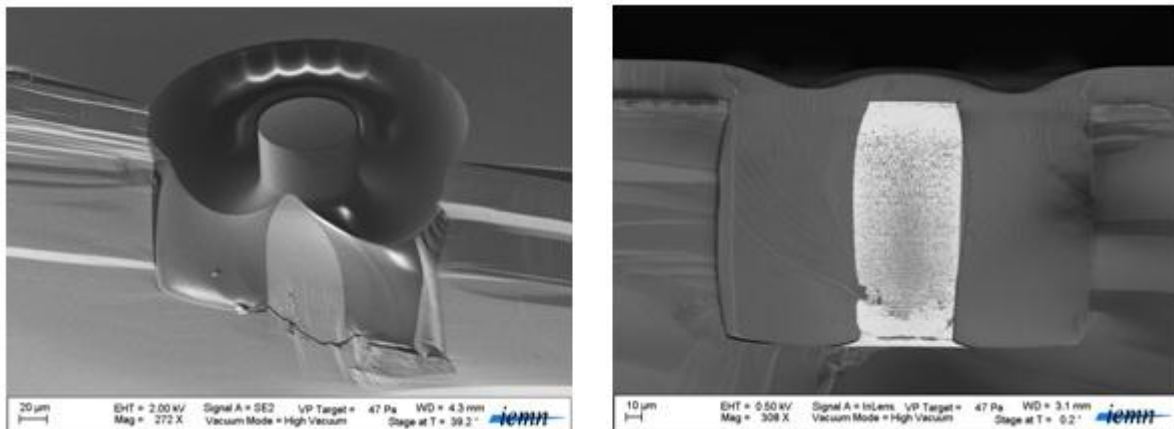


Figure 3-6 : Photos MEB vues en coupe de la cavité après un dépôt de BCB (à gauche) puis deux dépôts (à droite)

Enfin la Figure 3-7 présente les cavités remplies de résine BCB. Nous pouvons constater un remplissage homogène dans les différentes cavités.

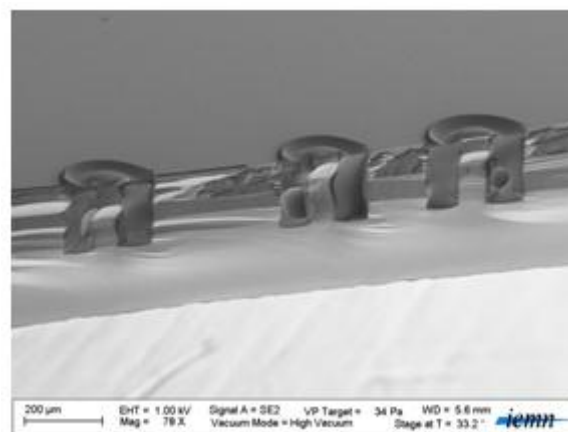


Figure 3-7 : Photo MEB d'une série de cavités remplies de BCB (vue en coupe)

3.5 Étape 5 : Gravure du BCB en face avant

La gravure du BCB reste nécessaire pour créer le contact métallique entre les lignes de propagation en surface et l'âme centrale du coaxial. Le procédé de gravure que nous utilisons est celui expliqué lors du procédé de réalisation précédent. C'est une gravure physique utilisant un bâti de plasma RIE (Reactive Ion Etching). Nous présentons en Figure 3-8 et Figure 3-9 les photos MEB des différents résultats de gravure sèche de BCB. Nous pouvons constater des flancs d'attaque droits ainsi qu'une rugosité très faible sur les flancs et le fond de la cavité.

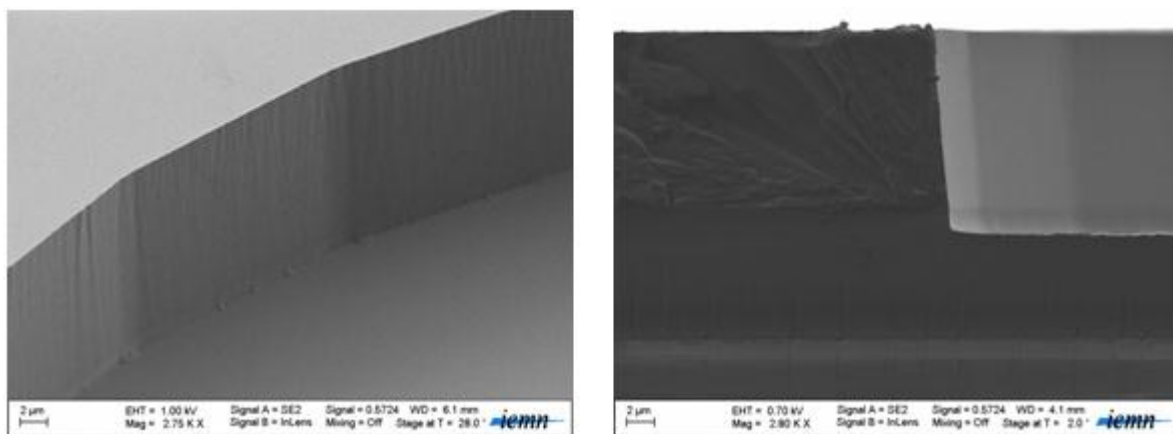


Figure 3-8 : Photos MEB des flancs de gravure sèche du BCB vue de trois quarts (à gauche) et vue de coupe (à droite)

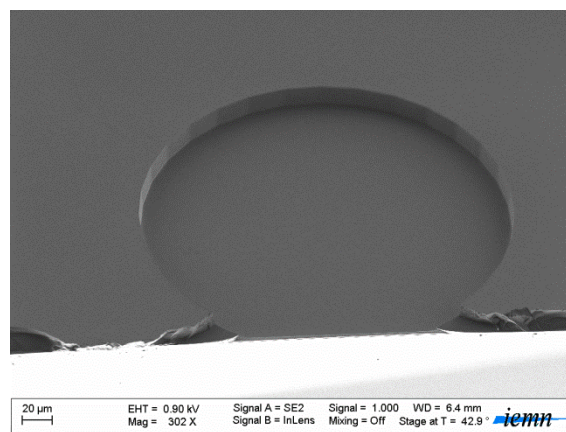


Figure 3-9 : Photos MEB des flancs de gravure sèche du BCB vue de haut

Les résultats de gravures, illustrés par la Figure 3-8 et la Figure 3-9, sont résumés dans le Tableau 3-1.

Type de gravure	Sèche, par plasma (RIE)
Gaz et débits utilisés	CF4 / 5 sccm, O2 / 20 sccm
Puissance du plasma	300 W
Pression dans l'enceinte	100 mT
Vitesse de gravure obtenue du BCB	0,9 µm/min
Angle de gravure	85°
Nature du masque	Aluminium
Vitesse de gravure du masque	#7 nm/min
Sélectivité masque/BCB	#130
Épaisseur de BCB gravée	12 µm
Épaisseur de masque requise	#100 nm

Tableau 3-1 : Propriétés de la gravure sèche du BCB

3.6 Étape 6 : amincissement du substrat de silicium

Cette étape d'amincissement du substrat de silicium va permettre de connecter la transition coaxiale en face arrière du substrat. Pour cela il est nécessaire d'amincir le substrat jusqu'à déboucher les transitions en face arrière. Cette étape utilise la gravure plasma pleine plaque. Ce procédé est le même que pour l'étape numéro deux, la gravure des cavités. Lors de l'étape deux, la gravure des cavités laisse un fond de silicium de quelques micromètres au fond des cavités. C'est ce fond qu'il faut maintenant enlever lors de cette étape.

3.7 Étape 7 : Métallisation des plans de masse face arrière et gravure

Cette étape est la même que l'étape numéro trois. Nous déposons une couche de métal titane/or en face arrière du substrat par pulvérisation cathodique afin de créer le contact des plans de masse en face arrière. Les épaisseurs déposées sont 100 nm pour le titane et 500 nm pour l'or. Avec cette étape nous créons les plans de masse en face arrière du substrat, en prenant contact sur les plans de masse présents sur les flancs des cavités. De plus, le dépôt métallique, réalisé en pleine plaque, renforce le court circuit entre les plans de masse et l'âme centrale de la transition coaxiale.

La deuxième partie de cette étape consiste à graver ce dépôt métallique sur la couronne correspondant au BCB. Ainsi on isole l'âme centrale du plan de masse. Cette gravure est réalisée par voie chimique. Un mélange d'attaque d'iodure de potassium (KI) va graver la couche d'or. Ensuite le substrat est plongé dans une solution de fluorure d'ammonium (NH_4F) qui gravera la couche de titane. Un masque de résine est nécessaire pour masquer les surfaces à ne pas graver. Il est réalisé avec une résine photosensible, l'AZ1518. La Figure 3-10 illustre cette étape.

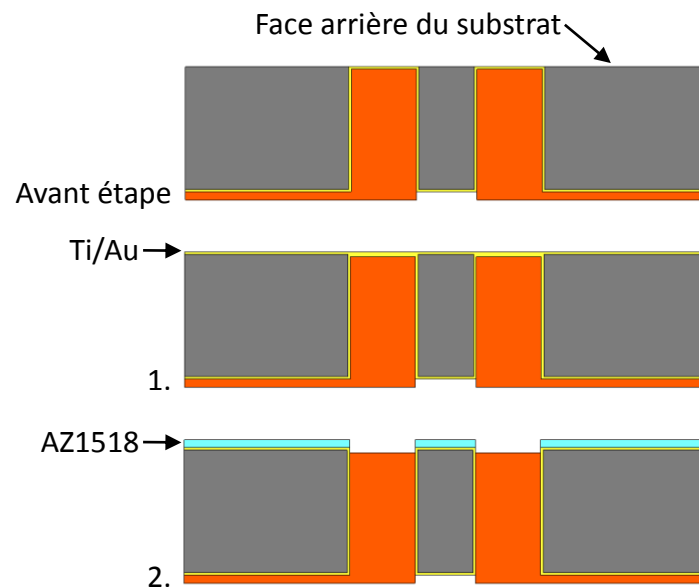


Figure 3-10 : Procédé de métallisation et gravure des plans de masse en face arrière

3.8 Étape 8 : Dépôt du BCB en face arrière

La face arrière du substrat doit comporter une couche de BCB, utilisé comme diélectrique pour les structures de propagation face arrière. Cette épaisseur est déposée par spin coating à l'aide d'une tournette. Elle est de $23\ \mu\text{m}$ d'épaisseur.

3.9 Étape 9 : Gravure du BCB face arrière au niveau de l'âme centrale

Cette épaisseur de BCB est ensuite gravée pour permettre le contact entre la structure de propagation en face arrière du substrat et l'âme centrale de la transition coaxiale (Figure 3-11). Cette gravure suit les mêmes lois que celle utilisée à l'étape 5 de ce procédé.



Figure 3-11 : Etape de gravure de la résine BCB en face arrière

3.10 Étape 10 : Métallisation des lignes de propagation

Enfin les lignes de propagation sont définies sur chaque face du substrat. Pour cela on réalise une métallisation par lift off. Le lift-off est une technique très utilisée en lithographie optique et qui permet d'avoir une bonne définition des motifs. Il est illustré en Figure 3-12. (1) D'abord un dépôt de résine photosensible est effectué sur le substrat, puis (2) une insolation et (3) la révélation de cette résine, choisie pour présenter ce profil en forme de "casquette" lorsqu'elle est révélée. (4) S'en suit la métallisation pleine plaque. (5) Enfin, pour créer les motifs, la résine est nettoyée. En se dissolvant, elle libère le métal qui avait été déposé sur la résine. Ne reste sur le substrat que les parties du métal qui avait été déposées directement sur le substrat.

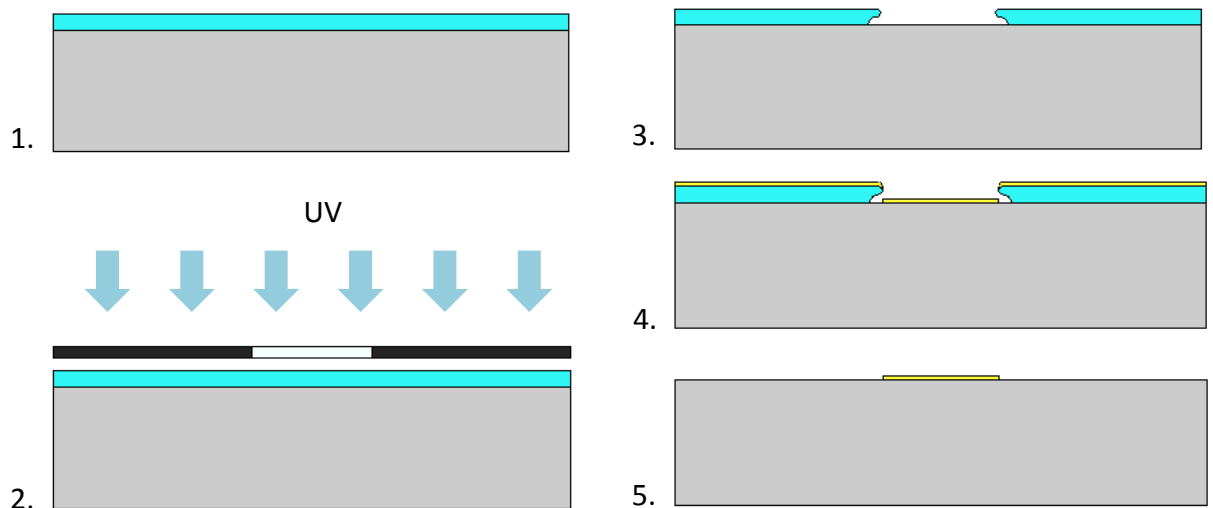


Figure 3-12 : Étapes de réalisation d'une métallisation par lift-off

3.11 Structure complète

La structure complète est illustrée

Figure 3-13. On y voit l'âme de la transition coaxiale, ainsi que les lignes de propagation micro-ruban en face avant et face arrière. La

Figure 3-14 présente une photo prise au MEB d'une ligne de transitions coaxiales mises en série.

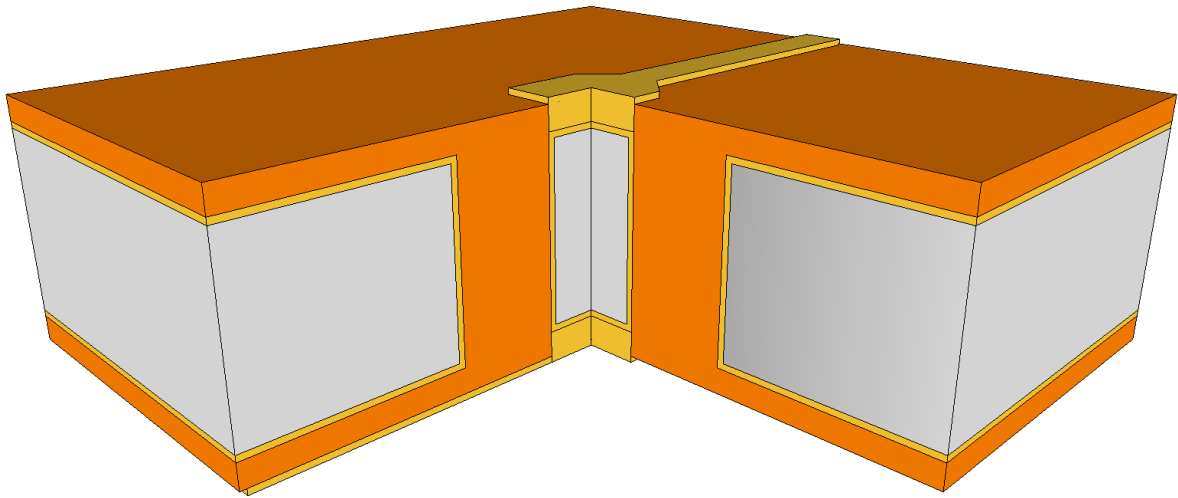


Figure 3-13 : Schéma de la structure complète, pour une seule transition, avec lignes micro-ruban en face avant et face arrière.

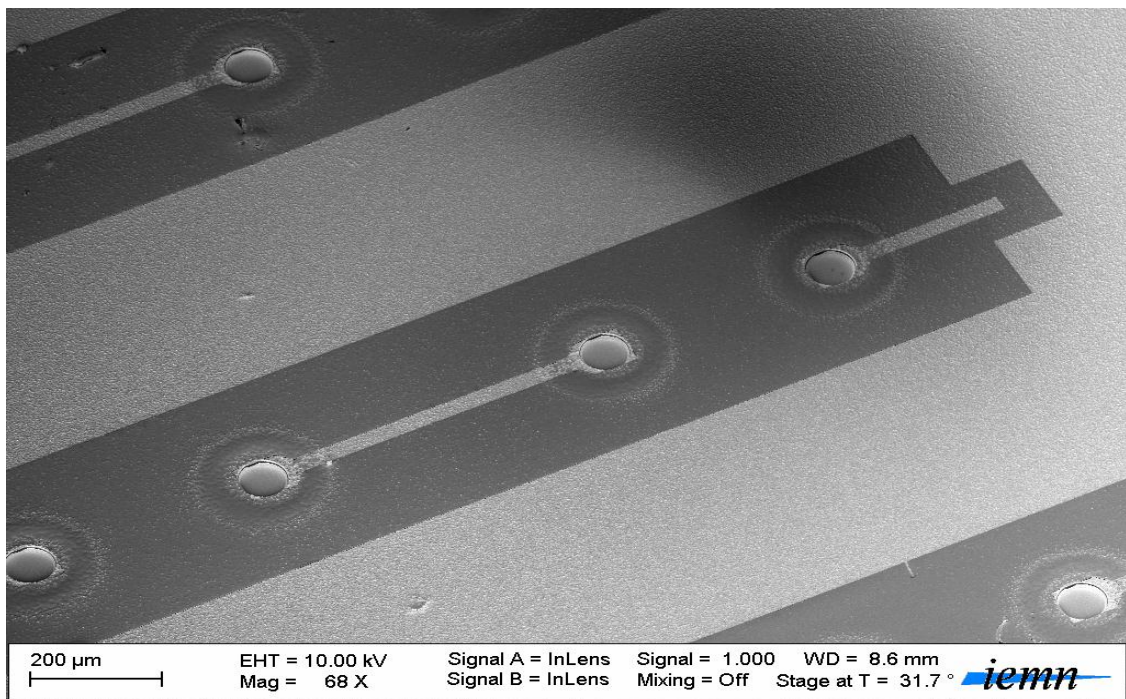


Figure 3-14 : Photo MEB des structures complètes vues en surface, pour une série de transitions coaxiales.

4 Fabrication et caractérisation des motifs de test:

La réalisation des motifs de test s'est avérée compromise dû aux problèmes de planéité. En effet, le volume du BCB dans la cavité présente, à sa surface, une planéité non optimale, avec

un dénivelé mesuré de 10 μ m sur une longueur de 85 μ m entre le bord de la cavité et l'âme centrale de la transition coaxiale. Ce dénivelé provoque des difficultés pour la photolithographie de la résine utilisée pour créer les motifs des lignes de propagation en surface. Les résultats de réalisation montrent que les lignes micro-ruban en surface, réalisées par un procédé de lift-off, présentent des coupures lorsque la ligne arrive au niveau de la cavité. Ces coupures sont créées par des résidus de résine photosensible, qui au lieu d'avoir été dissous lors de la photolithographie, sont toujours présents lors de la métallisation et de ce fait enlèvent le métal et créent ces microcoupures lors du lift-off.

Plusieurs méthodes ont été étudiées afin de réaliser les structures de propagation : le lift-off, expliqué précédemment, mais également l'électrolyse, utilisant un moule pour la croissance des lignes micro-rubans. Ce problème de microcoupures apparaît lors de chaque procédé. De ce fait, aucune mesure significative n'a pu être faite de nos structures, ces microcoupures créant de perturbations sur les signaux, de façon pseudo-aléatoire.

Afin de réaliser ces structures de test, il est nécessaire d'améliorer la planéité de surface des cavités de BCB, atteindre un dénivelé de 2 à 5 μ m de profondeur semble la limite physique pour la réalisation optimale des lignes de propagation.

Le temps imparti pour ces travaux, croisé aux moyens disponibles au sein du laboratoire de l'IEMN pour optimiser ces structures, ne nous a pas permis de terminer une réalisation complète de ces transitions verticales coaxiales. Ces travaux de thèse trouveront leur suite dans le projet SIPCOM, notamment par l'intégration du réseau d'antennes. L'optimisation de la planéité des cavités est en développement au sein du laboratoire, et permettra une réalisation complète de ces structures, ainsi que les caractérisations des motifs de test.

5 Références bibliographiques

1. IEMN. *Gravure DRIE RIE*. 2010; Available from: <http://www.iemn.univ-lille1.fr/fr/les-moyens/centrale-de-technologie/ses-equipements/gravures/gravures-seches-plasmas/gravures-drie-rie.html>.
2. IEMN, *Dépôt métallique par pulvérisation cathodique*. 2010, <http://www.iemn.univ-lille1.fr/fr/les-moyens/centrale-de-technologie/ses-equipements/croissances-et-depots-couches-minces/depots-metalliques.html>
4. Chen, Q., et al., *Thick benzocyclobutene etching using high density SF₆/O₂ plasmas*. Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2011. **29**(1): p. 0110191-0110196.
5. Chinoy, P.B., *Reactive ion etching of benzocyclobutene polymer films*. Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part C, IEEE Transactions on, 1997. **20**(3): p. 199-206.
6. Haixin, Z., H. Jiping, and B.C. Kim, *Processing and Characterization of Dry-Etch Benzocyclobutene as Substrate and Packaging Material for Neural Sensors*. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, 2007. **30**(3): p. 390-396.
7. Schier, M., *Reactive ion etching of benzocyclobutene using a silicon nitride dielectric etch mask*. Journal of the Electrochemical Society, 1995. **142**(9): p. 3238-3240.
8. Vitale, S.A., H. Chae, and H.H. Sawin, *Etching chemistry of benzocyclobutene (BCB) low-k dielectric films in high density plasmas*. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2000. **18**(6): p. 2770-2778.

CONCLUSION GENERALE

La communication est devenue aujourd'hui un sujet principal de recherche dans l'industrie des nouvelles technologies. Ce phénomène s'illustre déjà dans l'évolution des technologies actuelles, aussi bien dans le domaine de la communication H2M (Human to Machine) à travers par exemple les Smartphones sur le marché des particuliers, que dans le domaine de la communication M2M (Machine to Machine), que ce soit sur le marché automobile, avec les voitures connectées, ou encore la domotique. Ce phénomène est constaté également au niveau de la recherche technologique, que ce soit en micromécanique, où l'on peut citer les drones miniatures, ou en microélectronique, où des systèmes génériques sont étudiés. C'est poussés par ce phénomène que les domaines de recherche sur les objets mobiles communicants ou les réseaux de capteurs ont débuté.

La technologie d'intégration hétérogène 3D SiP a émergé de cette pensée, miniaturiser les systèmes en optimisant les performances globales. C'est également dans cette optique que l'IEMN a débuté ces travaux sur les réseaux de capteurs, en participant au projet ANR, appelé SIPCOM. Ce projet vise à démontrer la faisabilité d'une intégration hétérogène (System-In-Package) miniature, faible coût associant des MEMS RF à des circuits MMIC actifs et des antennes intelligentes pour établir des communications robustes en gamme millimétrique. Ces recherches ont fait l'objet de développements sur les technologies d'intégration. Ces travaux, sujets de ma recherche de thèse, sont présentés en détails dans ce manuscrit.

Dans le premier chapitre, les nombreux intérêts de la technologie d'intégration SiP ont été présentés. Nous avons vu que la technologie SiP, issue d'une évolution de l'intégration plus classique SoC, permet d'atteindre des performances uniques au niveau du système global. Nous avons exposé les défis du SiP, les points durs, ainsi que les possibilités que cette technologie d'intégration offre. Hétérogénéité, intégration en trois dimensions, miniaturisation, compatibilité avec les gammes de fréquences millimétriques, autant de points clés qui font de cette approche une technologie d'intégration unique. Nous avons présenté ensuite les points clés de la réussite de cette approche : l'amincissement, le report de puce, la mise en boîtier et les interconnexions. Nous avons détaillé plus particulièrement les interconnexions, notamment pour la liaison entre les différents niveaux du module. Une étude bibliographique a été effectuée concernant les technologies de transitions verticales susceptibles de parvenir aux critères de l'intégration SiP. Nous nous sommes ensuite concentrés sur la technologie des transitions verticales coaxiales.

Le deuxième chapitre présente notre étude, allant de la conception théorique d'une transition coaxiale idéale, à la simulation complète de la transition coaxiale finale, qui utilise le benzocyclobutène (BCB) comme matériau diélectrique et présente en simulations des résultats encore non atteints par les technologies existantes ou en développement. Cette structure finale améliore les performances électromagnétiques et l'encombrement, par

l'utilisation du BCB en tant que matériau diélectrique à très faibles pertes diélectriques ($\tan(\delta) = 0,003$) et à permittivité relative faible ($\epsilon_r = 2,65$) et l'optimisation de la géométrie de la structure. L'utilisation d'un plan de masse continu à travers le substrat, en supplément des lignes de propagation triplaques en surface, fournit une isolation complète de la structure par rapport au reste du système. Ceci permet d'annuler tout couplage électromagnétique parasite et laisse libre le choix de la nature du substrat à utiliser. Les TSCV (Through Silicon Coaxial Vias) développées lors de cette étude s'adaptent aux critères des applications d'intégration hétérogène 3D, qui sont un faible coût, une miniaturisation du système et une possibilité d'intégrer des systèmes provenant de filières technologiques différentes. Nous avons ensuite présenté les motifs de tests, constitués de paires de transitions coaxiales verticales en séries qui nous ont permis, d'une part, de mesurer les pertes électromagnétiques causées par les transitions, et d'autre part, de remonter aux pertes d'une transition unique. Nous proposons également un nouveau motif de filtres coupe-bande, utilisant ces transitions comme des stubs volumiques dans le substrat.

Le troisième chapitre présente quant à lui la réalisation technologique de ces structures. Nous avons montré l'évolution du procédé de réalisation, le développement de plusieurs étapes encore peu étudiées, ainsi que la modification du procédé qui a permis de pallier les verrous technologiques auxquels nous étions confrontés. En effet, l'impossibilité de réaliser des gravures sèches profondes du BCB nous a contraints à modifier notre approche de la définition volumique des structures. Au cours de ces travaux de thèse, la disponibilité (planing, panne à répétition du bâti de gravure profonde) des moyens au sein de l'IEMN pour optimiser ces structures, ne nous a pas permis de terminer une réalisation complète de ces transitions verticales coaxiales. Ces travaux de thèse trouveront leur suite dans le projet SIPCOM, notamment par l'intégration du réseau d'antennes. L'optimisation de la planéité des cavités est en développement au sein du laboratoire, et permettra une réalisation complète de ces structures, ainsi que les caractérisations des motifs de test.

Ces travaux vont se poursuivre:

- dans le cadre de la thèse de Tristan Sarrazin au sein de projet SIPCOM « conception et réalisation d'antennes à agilité de faisceaux » comme illustré Figure 5-1.

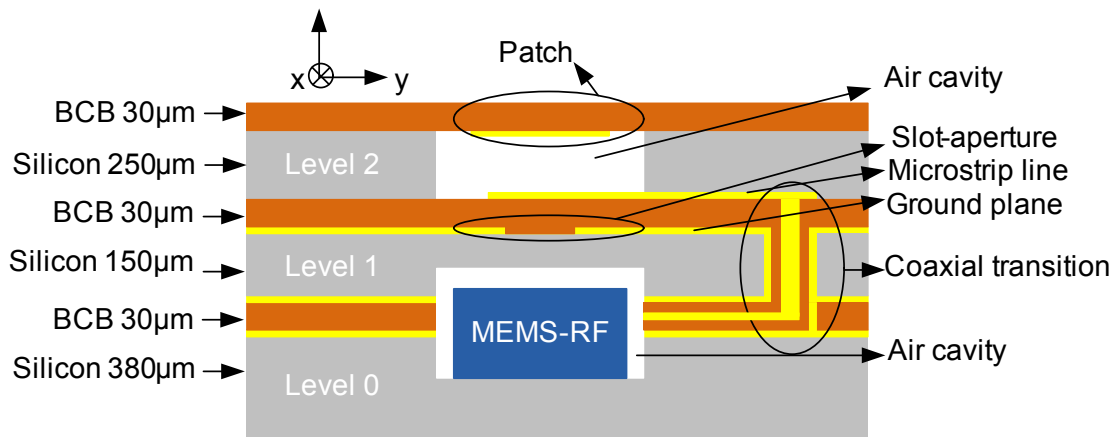


Figure 5-1 : schéma de principe d'antenne à agilité de faisceau pour module radio 3D en gamme millimétrique.

- dans le cadre de projets collaboratifs ambitieux du groupe CSAM portant sur des microsystèmes autonomes énergétiquement grâce à l'intégration d'un module énergie : microbatterie, dispositif de récupération d'énergie ambiante.

Ce travail a constitué une contribution importante à la définition d'un concept générique original répondant à l'approche "More Than Moore" et applicable à tout microsystème intelligent autonome.

CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES:

Workshop ST-Microelectronics – *Transitions verticales coaxiales en technologie Au/BCB pour les technologies d'intégration 3D et leur application pour modules en bande millimétrique* – R.CRUNELLE, N.ROLLAND, PA. ROLLAND - 16 mars 2009

Journées Nationales Micro-ondes, JNM 2009, Grenoble, France - *Transitions verticales coaxiales en technologie Au/BCB pour les technologies d'intégration 3D en gamme millimétrique* – 28 mai 2009, CRUNELLE R., SEOK S., FRYZIEL M., ROLLAND N., CATHELIN A., ROLLAND P.A, 3B-2, 1-4

GDR MNS 2010 – Poster - *Transitions verticales coaxiales en technologie Au/BCB pour les technologies d'intégration 3D en gamme millimétrique* –R.CRUNELLE, N. ROLLAND, PA. ROLLAND, 19 nov 2009

Workshop ST-Microelectronics - *Transitions verticales coaxiales en technologie Au/BCB pour les technologies d'intégration 3D en gamme millimétrique* – R.CRUNELLE, N. ROLLAND, PA. ROLLAND, 17 mars 2010

Proceedings of the 40th European Microwave Conference, EuMC 2010, Paris, France - *Vertical coaxial transitions for MM-waves 3D integration technologies* - CRUNELLE R., SEOK S., KIM J., FRYZIEL M., ROLLAND N., CATHELIN A., ROLLAND P., 28-30 sept. 2010, 101-104, ISBN 78-1-4244-7232-1

Journées Nationales Micro-ondes, JNM 2011, Brest, France - *Antenne microstrip alimentée par fente inversée pour l'intégration hétérogène 3D (system-in-package) en gamme millimétrique [60GHz]* - SARRAZIN T., CRUNELLE R., LAFOND O., HIMDI M., ROLLAND N. - 18-20 mai, 2011, papier 327, 4E7, 1-4

CMOS Emerging Technologies Meeting, CMOSSET 2011 - *Innovative ultrathin barrier GaN-based heterostructure : towards higher performance transmitters and receivers up to W band* - MEDJDOUB F., ZEGAOUI M., CRUNELLE R., ROLLAND N., ROLLAND P.A - , Whistler, BC, Canada, 15-17/06/2011

TABLE DES FIGURES

1 Chapitre I :

Figure 2-1 : Schéma 3D d'un concept de SiP	21
Figure 2-2 : technologies de découpe et amincissement de substrats	23
Figure 2-3 : Câblage par fil pour connectique de puces	24
Figure 2-4 : Câblage par fil connectique de puces en cascade, (à gauche), Zoom sur une microsoudure (à droite).....	24
Figure 2-5 : Schéma de la technologie Flip Chip	25
Figure 2-6 : Réalisation de bumps pour les interconnexions Flip Chip.....	26
Figure 3-1 : Concept du démonstrateur développé pour le projet SIPCOM	29
Figure 3-2 : Vue en coupe des transitions TSV pour lignes coplanaires (a) conventionnelles, (b) optimisées en surface.....	31
Figure 3-3 : Vue de dessus des transitions TSV pour lignes coplanaires (a) conventionnelles, (b) optimisées en surface.....	32
Figure 3-4 : Résultats de mesures électromagnétiques (a) pour les structures conventionnelles, (b) pour les structures optimisées, selon différents distances Dgnd	33
Figure 3-5 : Schéma de topologie des transitions "top-via"	34
Figure 3-6 : Transition Coplanaire-Coplanaire (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, (c) vue sur le wafer d'accueil avec bumps, et résultats de simulations et mesures électromagnétiques	34
Figure 3-7 : Transition Microruban-Microruban (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, et résultats de simulations et mesures électromagnétiques	35
Figure 3-8 : Transition Microruban-Coplanaire (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, et résultats de simulations et mesures électromagnétiques	35
Figure 3-9 : Transition Coplanaire-Microruban (a) et (b) vue de dessus, (c) vue de dessous, et résultats de simulations et mesures électromagnétiques	36
Figure 3-10 : Transition TSV multi-vias développée pour les lignes coplanaires	36

Figure 3-11 : Résultats de mesures électromagnétiques selon le diamètre des vias (100/200 μm) ainsi que le nombre de vias utilisé par plan de masse (indiqué par le nombre de G).....	37
Figure 3-12 : Résultats de mesures électromagnétiques dans la configuration : diamètre de via de 100 μm et quatre vias par plan de masse	37
Figure 3-13 : Design de transition par couplage utilisant des patches métalliques couplés à travers une fente dans le plan de masse	38
Figure 3-14 : Mesures du couplage électromagnétique pour deux dimensions de patches	38
Figure 3-15 : Design de transition par couplage utilisant les lignes coplanaires.....	39
Figure 3-16 : Carte du champ électrique dans la transition, selon les modes pair et impair..	39
Figure 3-17 : Simulations et mesures électromagnétiques obtenues avec cette transition...	39
Figure 3-18 : vue de dessus de la transition par couplage utilisant une cavité résonante dans le substrat	40
Figure 3-19 : Vue en coupe de la cavité, des plans de masse avec fentes et des lignes micro-rubans en surface.....	40
Figure 3-20 : Résultats de simulations électromagnétiques (HFSS et Ensemble) de la transition par couplage à cavité.....	41
Figure 3-21: Lignes coplanaires réalisées, qui descendent le long des flancs dans la cavité .	42
Figure 3-22 : Vue en coupe de l'empilement réalisé	42
Figure 3-23 : Mesures électromagnétiques de la ligne coplaire à transitions en pente (Libra Model) comparées à celle d'une ligne de référence (Planar Line)	43
Figure 3-24 : Vue en coupe de l'utilisation des transitions en pente pour du packaging de MEMS.....	44
Figure 3-25 : Accès coplaire réalisé en cavité pour le packaging de MEMS.....	44
Figure 3-26 : Zoom sur la descente de la ligne coplaire dans la cavité	44
Figure 3-27 : Mesures électromagnétiques de cette transition	45
Figure 3-28 : Transition coaxiale à base de résine SU-8	46
Figure 3-29 : Comparaison des structures TSV (a) et Coaxiale (b) disposées en mode coplaire	46
Figure 3-30 : Résultats de simulations et mesures électromagnétiques	47

Figure 3-31 : Procédé de réalisation des interconnexions coaxiales (1) et dimensions (2)	47
Figure 3-32 : Résultats de simulations et de mesures électromagnétiques	48
Figure 3-1 : Quelques exemples de technologies planaires: (a) ligne micro-ruban (b) ligne coplanaire (c) ligne triplaque (d) ligne à fente.....	57
Figure 3-2 : lignes de champ des deux modes de propagation	58
Figure 4-1 : Transition coaxiale idéale dans un substrat de silicium	60
Figure 4-2: Vue de coupe de la structure coaxiale idéale.....	61
Figure 4-3 : Structures présentant des ruptures d'impédance caractéristique	61
Figure 4-4 : Vue en coupe du modèle coaxial.....	62
Figure 4-5 : Vue de coupe d'une ligne micro-ruban	63
Figure 4-6 : Dimensions de la structure idéale	64
Figure 4-7 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition idéale avec $D_{via}=30 \mu\text{m}$ et n variant de 6 à 10.....	64
Figure 4-8 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition idéale avec $D_{via}=30 \mu\text{m}$ et n variant de 6 à 10	65
Figure 4-9 : Schéma de la modification de l'impédance caractéristique par la modification de la géométrie.....	66
Figure 4-10 : Schéma du taper.....	67
Figure 4-11 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition idéale avec $D_{via}=37,5 \mu\text{m}$ et n variant de 5 à 9	68
Figure 4-12 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition idéale avec $D_{via}=37,5 \mu\text{m}$ et n variant de 5 à 9	68
Figure 4-13 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition idéale avec $D_{via}=50 \mu\text{m}$ et n variant de 4 à 8	69
Figure 4-14 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition idéale avec $D_{via}=50 \mu\text{m}$ et n variant de 4 à 8	70
Figure 4-15 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition idéale avec $D_{via}=75 \mu\text{m}$ et n variant de 3 à 7	70
Figure 4-16 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition idéale avec $D_{via}=75 \mu\text{m}$ et n variant de 3 à 7	71

Figure 4-17 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de chaque cas optimal	72
Figure 4-18 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de chaque cas optimal.....	73
Figure 5-1 : structure utilisant quatre vias de masse	75
Figure 5-2 : Comparaison des structures (a) avec plan de masse continu et (b) avec vias de masse	75
Figure 5-3 : Comparaison du coefficient de réflexion (S_{11}) pour une structure à plan de masse continu (plein) et une structure à plan de masse à quatre vias et un rapport $n=7$	76
Figure 5-4 : Comparaison du coefficient de transmission (S_{21}) pour une structure à plan de masse continu (plein) et une structure à plan de masse à quatre vias et un rapport $n=7$	77
Figure 5-5 : structure utilisant huit vias de masse.....	78
Figure 5-6 : Comparaison du coefficient de réflexion (S_{11}) pour une structure à plan de masse continu (plein), une structure à plan de masse à quatre vias et une structure à plan de masse à 8 vias.....	79
Figure 5-7 : Comparaison du coefficient de transmission (S_{21}) pour une structure à plan de masse continu (plein), une structure à plan de masse à 4 vias et une structure à plan de masse à 8 vias	79
Figure 6-1 : Comparaison du coefficient de réflexion (S_{11}) pour une structure sur substrat silicium basse résistivité (LRS) et une structure sur substrat silicium haute résistivité (HRS)	83
Figure 6-2 : Comparaison du coefficient de transmission (S_{21}) pour une structure sur substrat silicium basse résistivité (LRS) et une structure sur substrat silicium haute résistivité (HRS)	83
Figure 7-1 : Carte du champ électrique et des lignes de champs électriques dans la structure	85
Figure 7-2 : Structure développée pour l'étude du couplage électromagnétique.....	86
Figure 7-3 : Coefficient de transmission (S_{13}) entre les deux structures pour différents espacements	87
Figure 7-4 : Coefficient de transmission (S_{14}) entre les deux structures pour différents espacements	87
Figure 7-5 : Structure à double lignes micro-rubans	88
Figure 7-6 : Coefficient de transmission (S_{13}) pour une structure à double ligne micro-ruban pour différents espacements.....	89

Figure 7-7 : Coefficient de transmission (S_{14}) pour une structure à double ligne micro-ruban pour différents espacements.....	89
Figure 7-8 : Architecture utilisée lors des simulations afin de déterminer le couplage de la transition verticale seule	90
Figure 7-9 : Coefficient de transmission (S_{13}) dû au couplage électromagnétique de la transition verticale seule	91
Figure 7-10 : Coefficient de transmission (S_{14}) dû au couplage électromagnétique de la transition verticale seule	91
Figure 7-11 : Quatre vias de masses en configuration alignée (à gauche) et décalée (à droite)	92
Figure 7-12 : Six vias de masses en configuration alignée (à gauche) et décalée (à droite) ...	92
Figure 7-13 : Huit vias de masses en configuration alignée (à gauche) et décalée (à droite) .	93
Figure 7-14 : Évolution du coefficient de transmission (S_{13}) selon le nombre de vias de masse et leur configuration	94
Figure 8-1 : Transition coaxiale utilisant du BCB comme matériau diélectrique	96
Figure 8-2 : Vue de coupe de la transition coaxiale BCB	96
Figure 8-3 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale BCB selon différents rapport n allant de 2,8 à 3,6	97
Figure 8-4 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale BCB selon différents rapport n allant de 2,8 à 3,6	97
Figure 8-5 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) des différentes structures étudiées.....	98
Figure 8-6 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) des différentes structures étudiées.....	99
Figure 8-7 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) des différentes structures étudiées sur silicium basse résistivité	100
Figure 8-8 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) des différentes structures étudiées sur silicium basse résistivité.....	101
Figure 8-9 : Plan de coupe du champ électrique de la transition coaxiale BCB	102
Figure 8-10 : Comparaison des modèles de lignes de propagation micro-ruban et triplaque	103

Figure 8-11 : Structure coaxiale BCB utilisant les lignes triplaques en surface	104
Figure 8-12 : Plan de coupe de la structure coaxiale BCB utilisant les lignes triplaques en surface.....	104
Figure 8-13 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) des structures à lignes micro-rubans et triplaques.....	105
Figure 8-14 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) des structures à lignes micro-rubans et triplaques	105
Figure 8-15 : Coefficient de réflexion (S_{11}) large bande de la transition coaxiale utilisant des lignes triplaques en surface.	106
Figure 8-16 : Coefficient de transmission (S_{21}) large bande de la transition coaxiale utilisant des lignes triplaques en surface.....	107
Figure 9-1 : Vue de coupe de la structure de test	107
Figure 9-2 : Mise en série par paires de transitions pour la mesure sous pointes.....	108
Figure 9-3 : Variation du nombre de transitions en série pour mesures sous pointes	108
Figure 9-4 : Filtre 3D développé présentant deux stubs	109
Figure 9-5 : Vue en coupe d'un filtre 3D présentant 4 stubs.....	110
Figure 9-6 : Coefficient de réflexion (S_{11}) du filtre 3D pour différentes séries de stubs	110
Figure 9-7 : Coefficient de transmission (S_{21}) du filtre 3D pour différentes séries de stubs.	111
Figure 2-1 : Étapes du procédé de fabrication initial des transitions coaxiales	115
Figure 2-2 : Schéma de gravure (1) anisotrope, (2) isotrope.....	117
Figure 2-3 : schéma du bâti de gravure silicium ICP-RIE (http://www.iemn.univ-lille1.fr/fr/les-moyens/centrale-de-technologie/ses-equipements/gravures/gravures-seches-plasmas/gravures-drie-rie.htm).....	118
Figure 2-4 : Photos MEB de silicium "noir"	119
Figure 2-5 : Photo MEB de Piliers présents dans le fond de gravure d'une cavité dans le silicium	120
Figure 2-6 : Photo au microscope électronique de la face arrière d'une cavité débouchée dans le silicium, dont la fin de gravure a été mal contrôlée.....	121
Figure 2-7 : Photo MEB de la coupe d'une cavité gravée dans le silicium, réalisée par le procédé SPR220	122

Figure 2-8 : Photos MEB de flancs de cavités couverts de C_4F_8	122
Figure 2-9 : Schéma de principe du procédé de pulvérisation cathodique.....	123
Figure 2-10 : Photo MEB du phénomène de scalloping sur le flanc des cavités silicium	124
Figure 2-11 : Photo MEB de problèmes de métallisation dus au scalloping	125
Figure 2-12 : Comparaison des flancs avant lissage (à gauche) et après lissage (à droite)...	125
Figure 2-13 : Zoom sur le fond de gravure	126
Figure 2-14 : Zoom sur le flanc de cavité en surface	126
Figure 2-15 : Mesure MEB de la différence du scalloping avant lissage (à gauche) et après lissage (à droite).....	126
Figure 2-16 : Photo MEB de la métallisation des flancs dans le fond de la cavité	127
Figure 2-17 : Étapes du report du film de BCB en face arrière et dépôt de BCB dans les cavités	128
Figure 2-18 : Problèmes liés au dépôt de BCB (a) Bulles d'air et (b) inhomogénéité.....	129
Figure 2-19 : Problème au décollement du substrat d'accueil	130
Figure 2-20 : Schéma de principe du procédé de report de capots de BCB utilisant une couche non adhésive de SAM	131
Figure 2-21 : Différence entre les gravures du BCB (a) anisotrope et (b) isotrope	131
Figure 2-22 : Insolation (1) et Développement (2) du BCB photosensible	132
Figure 3-1 : Procédé de réalisation technologique modifié	134
Figure 3-2 : Photos MEB d'un pilier gravé dans le silicium (à gauche) et vue de la tranche (à droite)	135
Figure 3-3 : Photos MEB du fond de la cavité (à gauche) et zoom sur la rugosité de surface du pilier (à droite)	136
Figure 3-4 : Photos MEB de la métallisation des flancs au fond de la cavité (à gauche) et analyse EDX des matériaux (à droite)	136
Figure 3-5 : Photos MEB vues de dessus de la cavité après un dépôt de BCB (à gauche) puis deux dépôts (à droite)	137
Figure 3-6 : Photos MEB vues en coupe de la cavité après un dépôt de BCB (à gauche) puis deux dépôts (à droite)	138

Figure 3-7 : Photo MEB d'une série de cavités remplies de BCB (vue en coupe).....	138
Figure 3-8 : Photos MEB des flancs de gravure sèche du BCB vue de trois quarts (à gauche) et vue de coupe (à droite).....	139
Figure 3-9 : Photos MEB des flancs de gravure sèche du BCB vue de haut	139
Figure 3-10 : Procédé de métallisation et gravure des plans de masse en face arrière	141
Figure 3-11 : Etape de gravure de la résine BCB en face arrière	142
Figure 3-12 : Étapes de réalisation d'une métallisation par lift-off	142
Figure 3-13 : Schéma de la structure complète, pour une seule transition, avec lignes micro-ruban en face avant et face arrière.	143
Figure 3-14 : Photo MEB des structures complètes vues en surface, pour une série de transitions coaxiales.....	143
Figure 5-1 : schéma de principe d'antenne à agilité de faisceau pour module radio 3D en gamme millimétrique.....	151
Figure 1-1 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 37,5 μm	166
Figure 1-2 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 37,5 μm	167
Figure 1-3 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 50 μm	167
Figure 1-4 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 50 μm	168
Figure 1-5 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 75 μm	168
Figure 1-6 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 75 μm	169
Figure 1-7 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium.	169
Figure 1-8 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium.	170
Figure 1-9 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 37,5 μm	171

Figure 1-10 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 37,5 μm172

Figure 1-11 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 50 μm172

Figure 1-12 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 50 μm173

Figure 1-13 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 75 μm173

Figure 1-14 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 75 μm174

Figure 1-15 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 37,5 μm . 175

Figure 1-16 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 37,5 μm176

Figure 1-17 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 50 μm176

Figure 1-18 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 50 μm177

Figure 1-19 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 75 μm178

Figure 1-20 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 75 μm178

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Évolution des technologies de Câblage par fil	25
Tableau 3-1 : Comparaison des technologies de transitions verticales	49
Tableau 4-1 : Propriétés des matériaux.....	61
Tableau 4-2 : Dimensions de la ligne micro-ruban	63
Tableau 4-3 : différents cas étudiés selon la variation du diamètre des vias.....	67
Tableau 4-4 : Rapport n optimal correspondant à chaque rapport d'aspect étudié	71
Tableau 5-1 : Résumé des performances des différentes structures étudiées.....	80
Tableau 6-1 : Propriétés du silicium basse résistivité	82
Tableau 7-1 : Valeurs du coefficient de transmission (S_{13}) selon le nombre de vias de masse et leur configuration	94
Tableau 8-1 : Récapitulatifs des propriétés de chaque structure étudiée	99
Tableau 8-2 : Comparaison des performances des structures à lignes micro-rubans et triplaques	106
Tableau 9-1 : Fréquences de coupure présentées par les différents filtres 3D	111
Tableau 2-1 : Paramètres de dépôt du BCB par spin coating sur un substrat de 3 pouces ..	130
Tableau 2-2 : Propriétés en gravure sèche du BCB et des différents matériaux de masquage étudiés.....	132
Tableau 3-1 : Propriétés de la gravure sèche du BCB	140

ANNEXES

1 Conception de la transition verticale coaxiale

1.1 Etudes des rapports d'aspects optimaux selon chaque diamètre de via étudié – Structure Silicium

Les figures suivantes présentent les performances électromagnétiques (S_{21} et S_{11}) des différents diamètres de vias étudiés et selon plusieurs rapport d'aspect entre le diamètre du via et le diamètre total de la transition coaxiale (n).

1.1.1 CAS n°1 : Diamètre de via de $37,5 \mu\text{m}$, n variant de 4 à 8.

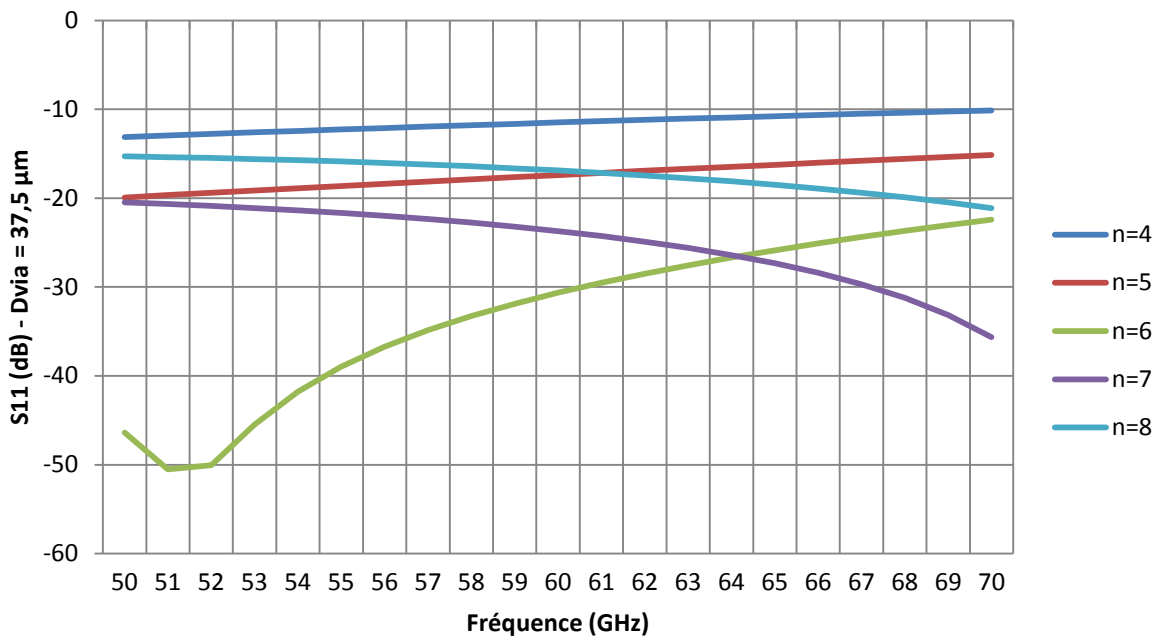


Figure 1-1 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de $37,5 \mu\text{m}$.

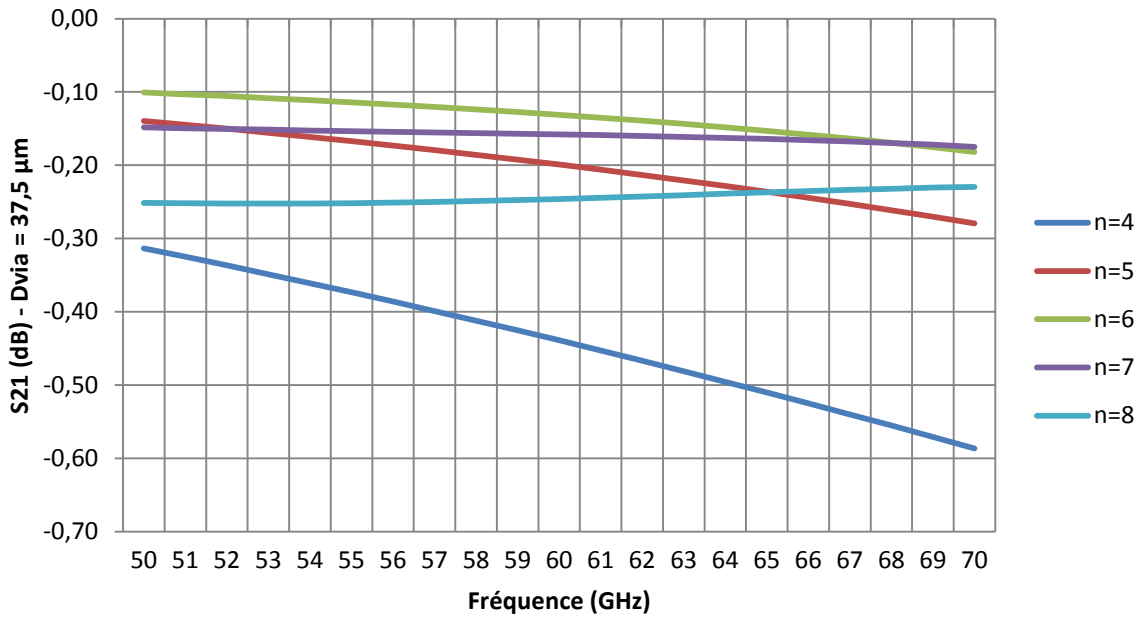


Figure 1-2 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de $37,5 \mu\text{m}$.

Pour un diamètre de via de $37,5 \mu\text{m}$, les meilleures performances correspondent à un rapport n de 6, avec un coefficient de réflexion de -31 dB et un coefficient de transmission de -0.13 dB à 60 GHz . Un rapport n de 6 signifie un diamètre de transition coaxiale de $225 \mu\text{m}$.

1.1.2 CAS n°2 : Diamètre de via de $50 \mu\text{m}$, n variant de 4 à 8.

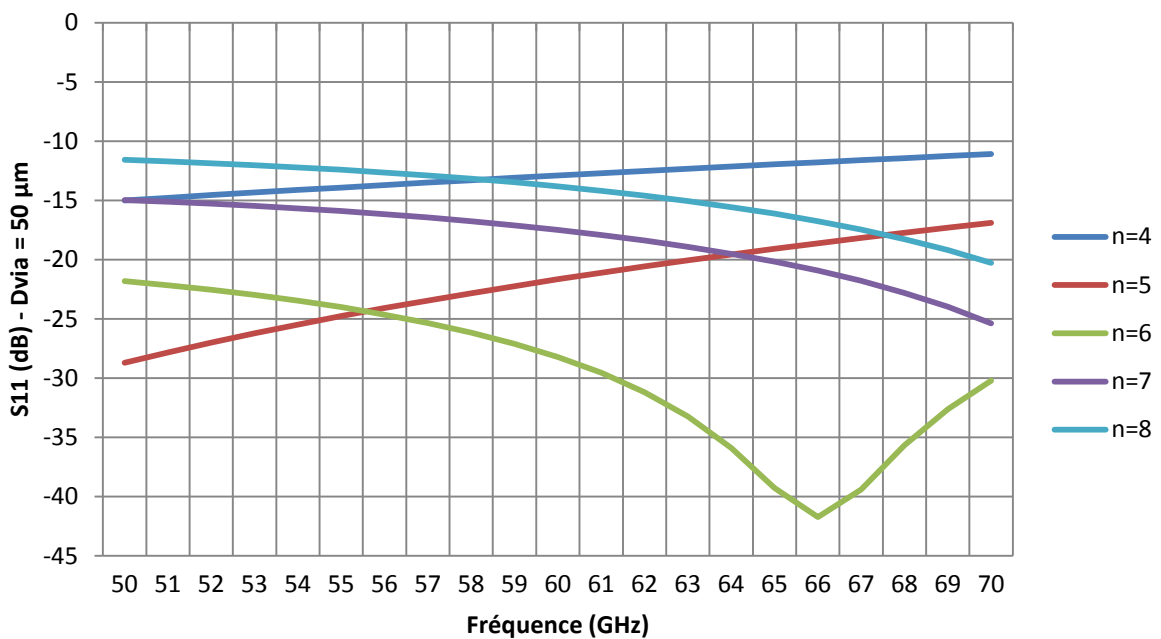


Figure 1-3 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de $50 \mu\text{m}$.

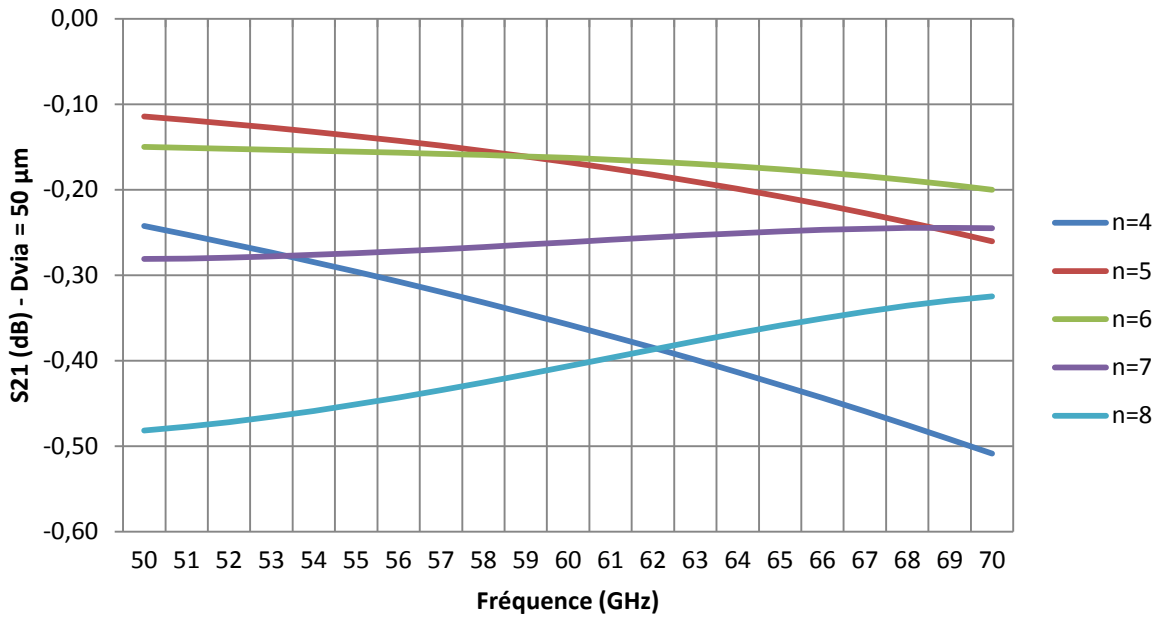


Figure 1-4 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 50 μm .

Pour un diamètre de via de 50 μm , les meilleures performances correspondent à un rapport n de 6, avec un coefficient de réflexion de -28 dB et un coefficient de transmission de -0.16 dB à 60 GHz. Un rapport n de 6 signifie un diamètre de transition coaxiale de 300 μm .

1.1.3 CAS n°3 : Diamètre de via de 75 μm , n variant de 3 à 7.

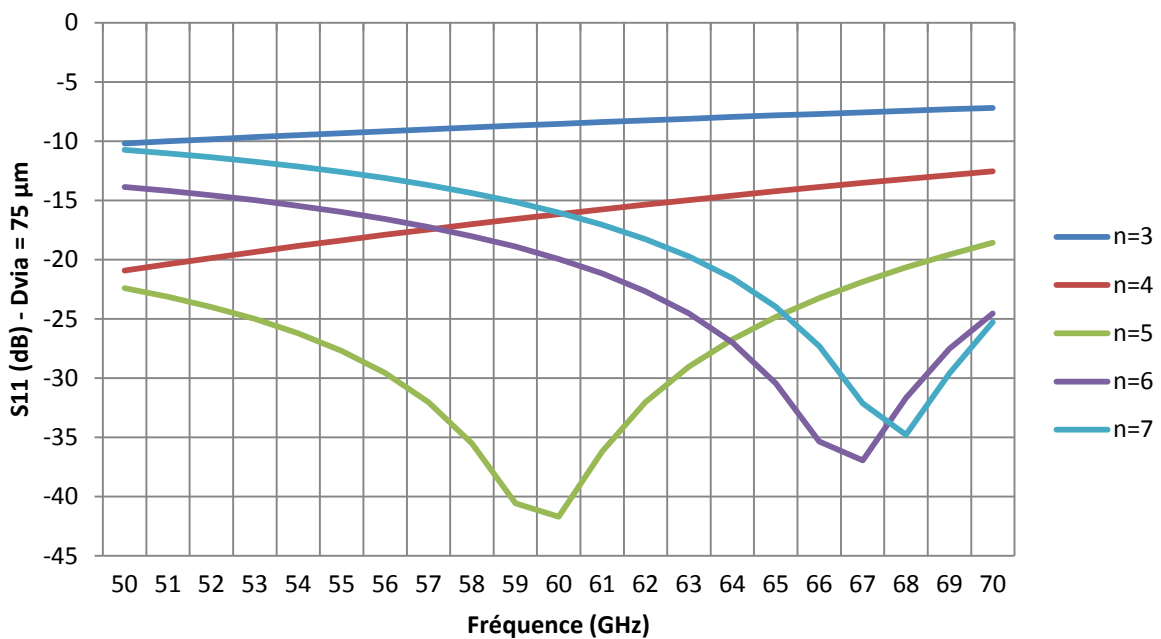


Figure 1-5 : Coefficient de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 75 μm .

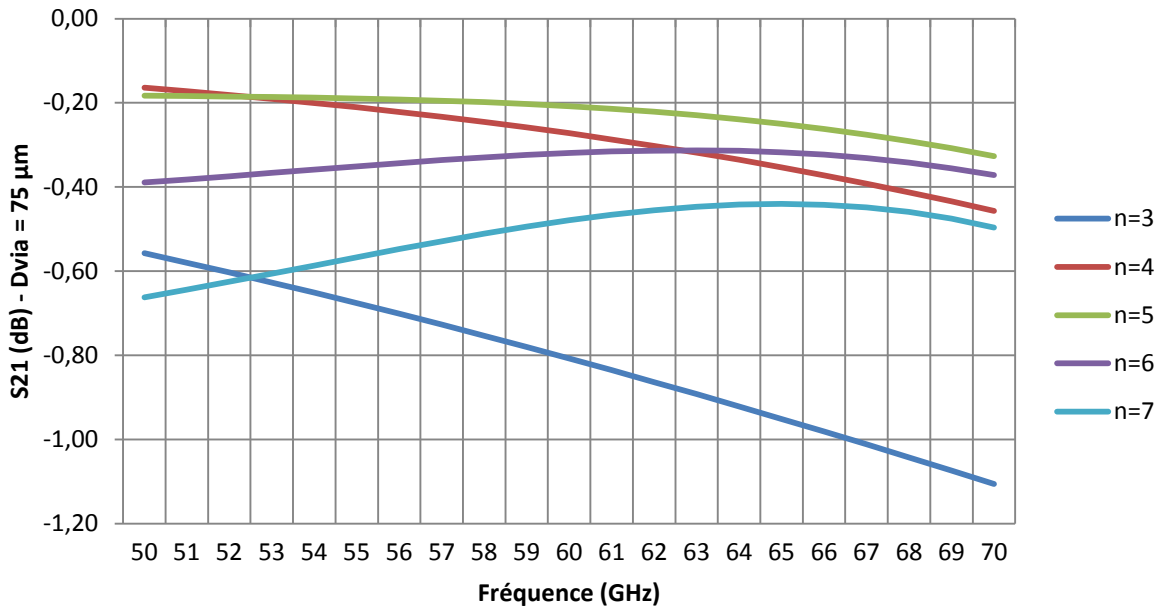


Figure 1-6 : Coefficient de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium pour un diamètre de via de 75 µm.

Pour un diamètre de via de 75 µm, les meilleures performances correspondent à un rapport n de 5, avec un coefficient de réflexion de -42 dB et un coefficient de transmission de -0.21 dB à 60 GHz. Un rapport n de 5 signifie un diamètre de transition coaxiale de 210 µm.

1.1.4 Comparaison des différents cas dans leur configuration optimale :

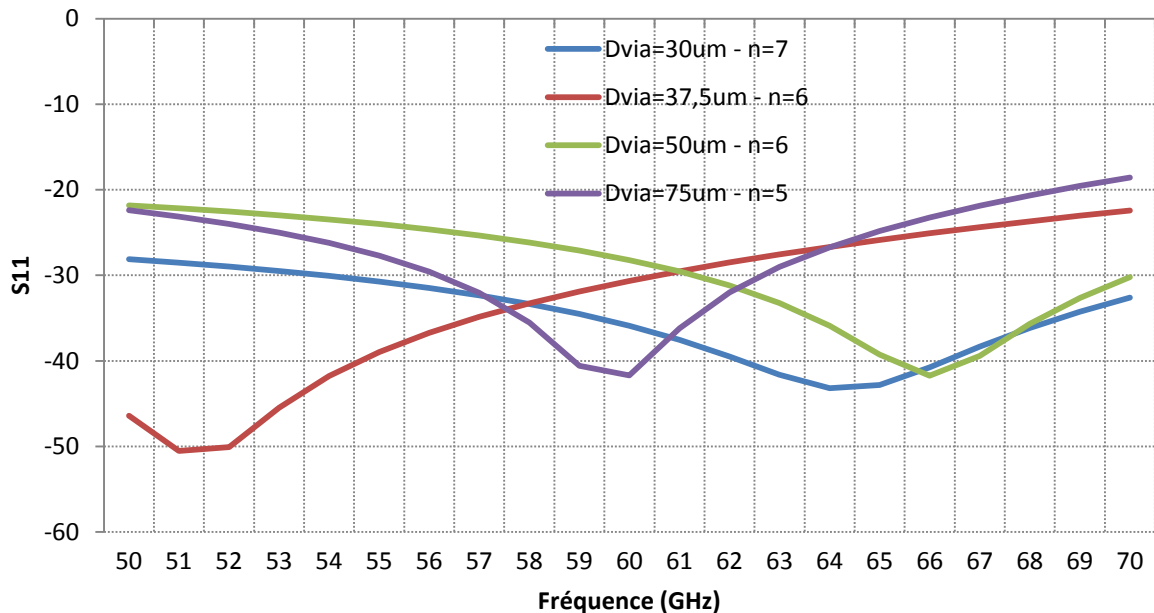


Figure 1-7 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium.

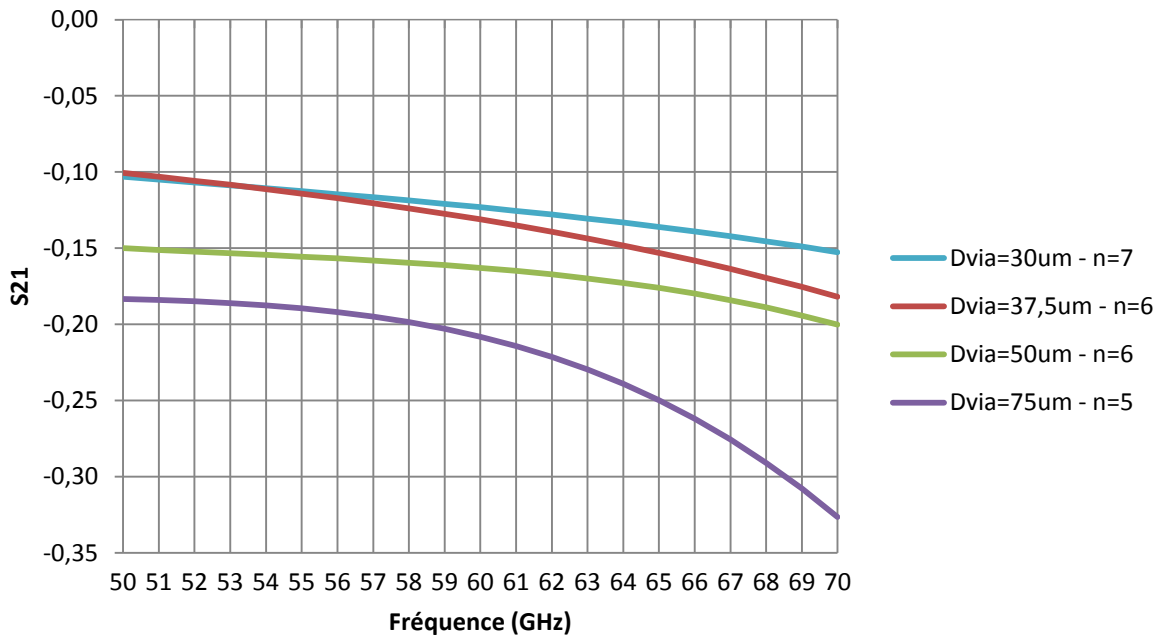


Figure 1-8 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium.

La comparaison des résultats de simulations de chaque diamètre de via, configuré dans son rapport n optimal, montre que le diamètre de via le plus étroit (30 μm) présente les meilleures performances électromagnétiques, en termes d'adaptation et de transmission.

1.2 Etude de la modélisation du plan de masse par 4 vias, selon chaque diamètre de via étudié – Structure Silicium

Les figures suivantes présentent les performances électromagnétiques (S_{21} et S_{11}) des différents diamètres de vias étudiés et selon la configuration du plan de masse : plan de masse plein (continu) ou plan de masse modélisé par 4 vias.

1.2.1 CAS n°1 : Diamètre de via de $37,5 \mu\text{m}$.

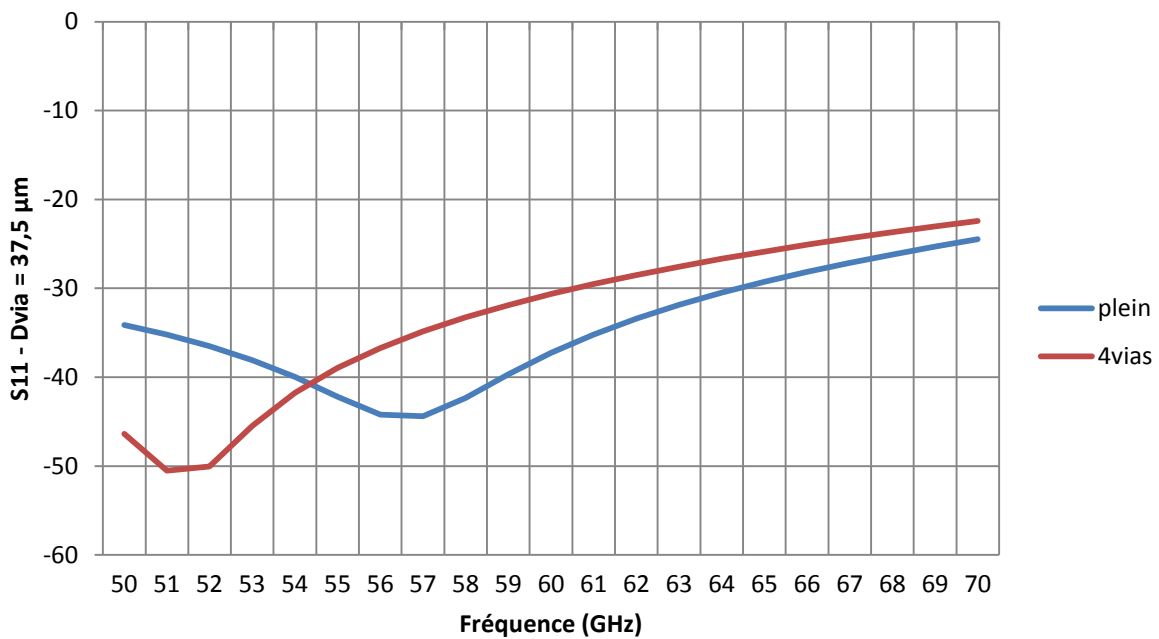


Figure 1-9 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de $37,5 \mu\text{m}$.

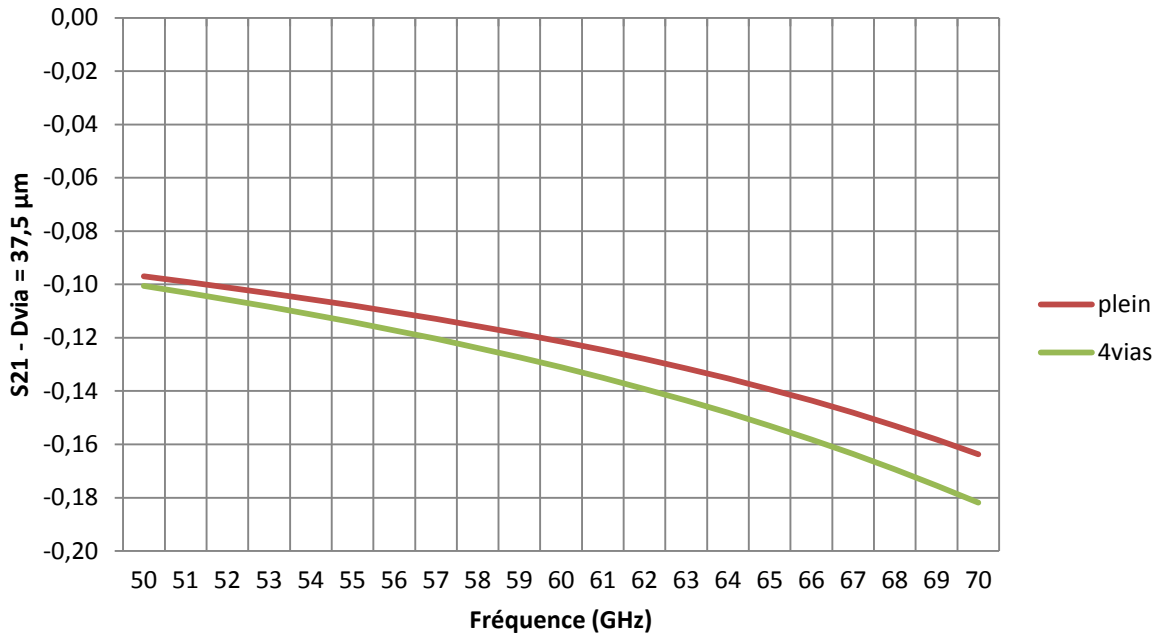


Figure 1-10 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 37,5 μm .

1.2.2 CAS n°2 : Diamètre de via de 50 μm .

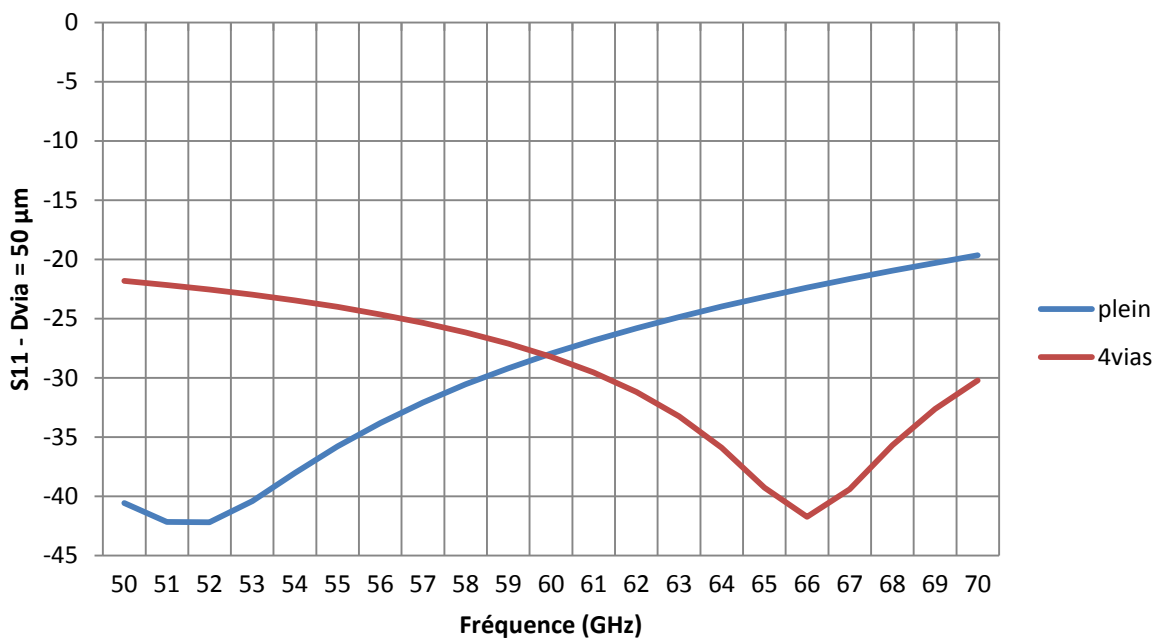


Figure 1-11 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 50 μm .

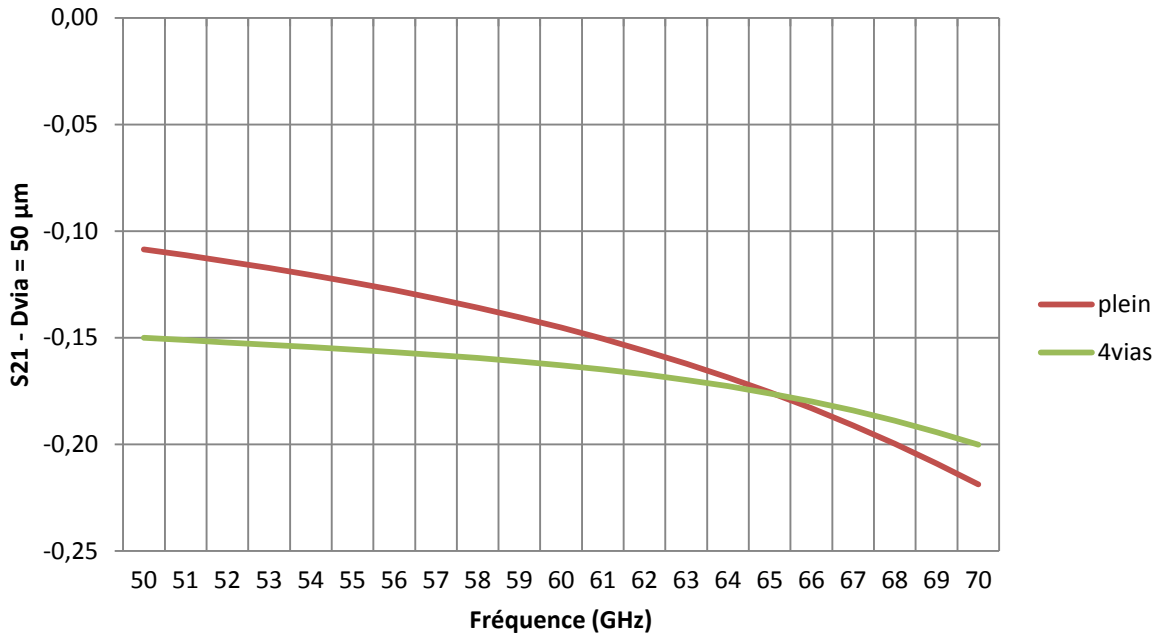


Figure 1-12 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 50 μm .

1.2.3 CAS n°3 : Diamètre de via de 75 μm .

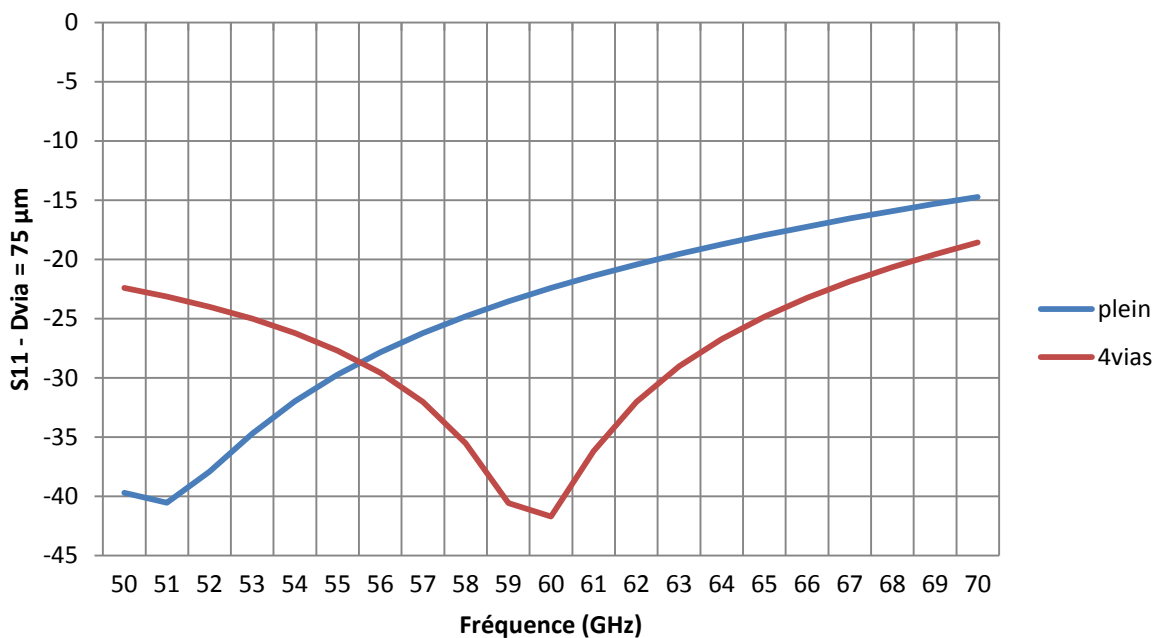


Figure 1-13 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de 75 μm .

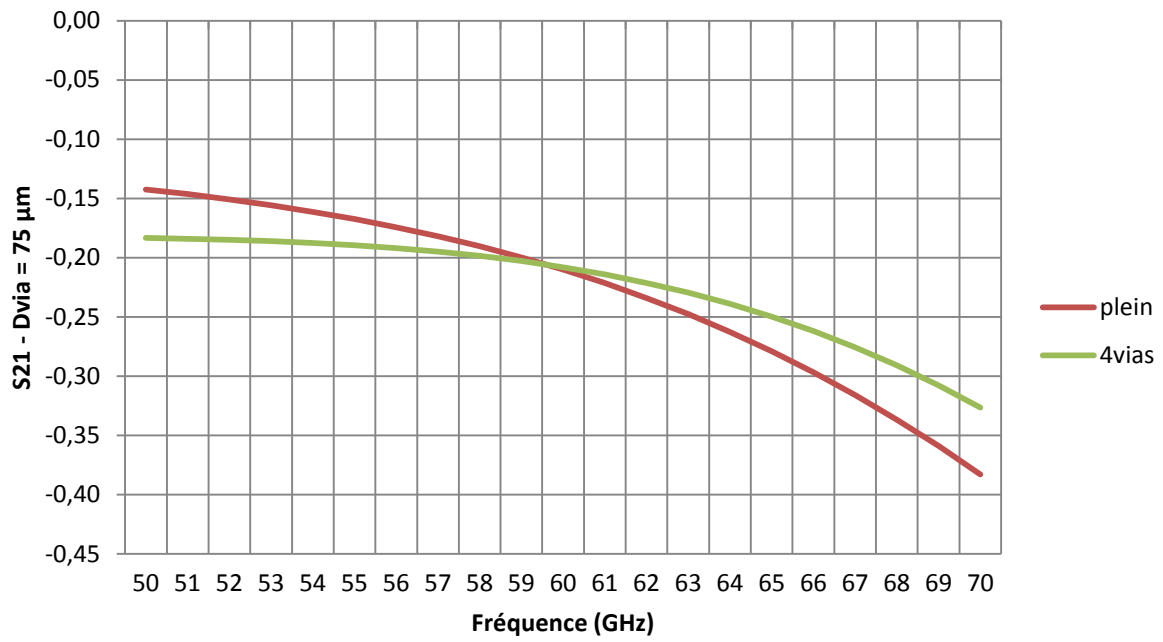


Figure 1-14 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein ou 4 vias) pour un diamètre de via de $75 \mu\text{m}$.

1.3 Etude de la modélisation du plan de masse par 8 vias, selon chaque diamètre de via étudié – Structure Silicium

Les figures suivantes présentent les performances électromagnétiques (S_{21} et S_{11}) des différents diamètres de vias étudiés et selon la configuration du plan de masse : plan de masse plein (continu) ou plan de masse modélisé par 4 vias, ou plan de masse modélisé par 8 vias.

1.3.1 CAS n°1 : Diamètre de via de 37,5 μm .

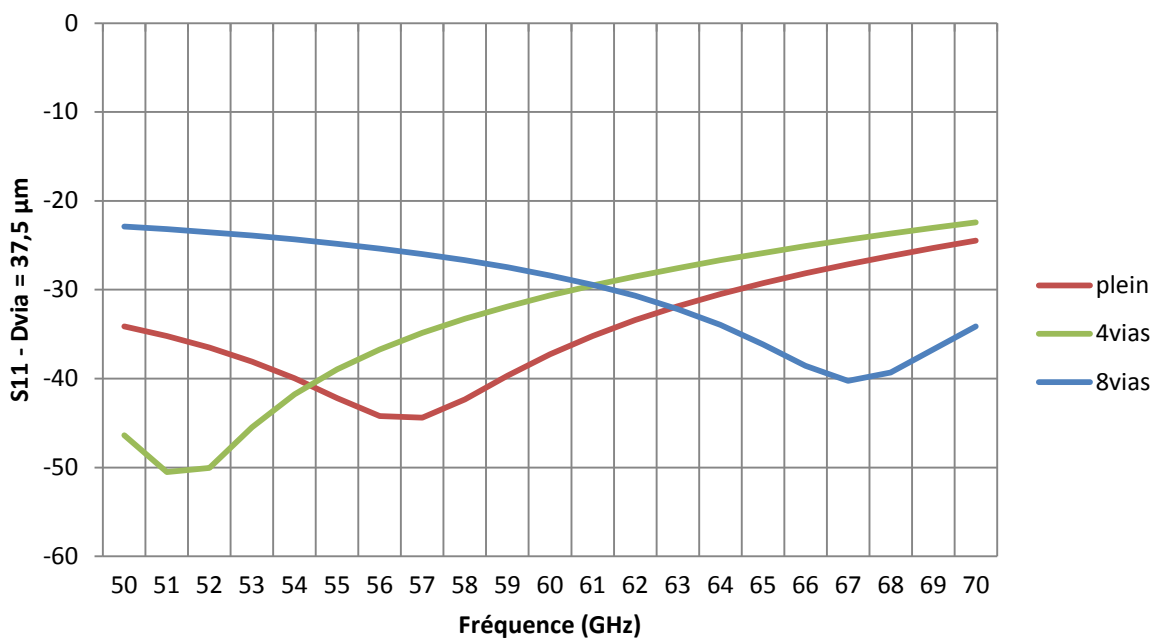


Figure 1-15 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 37,5 μm .

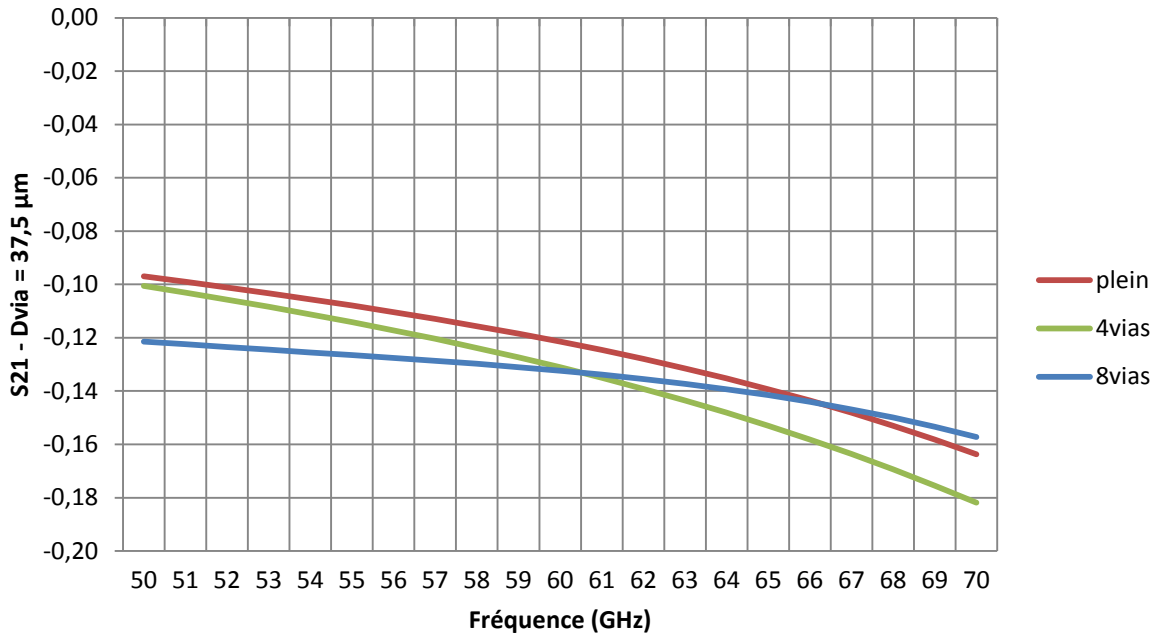


Figure 1-16 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 37,5 μm .

1.3.2 CAS n°2 : Diamètre de via de 50 μm .

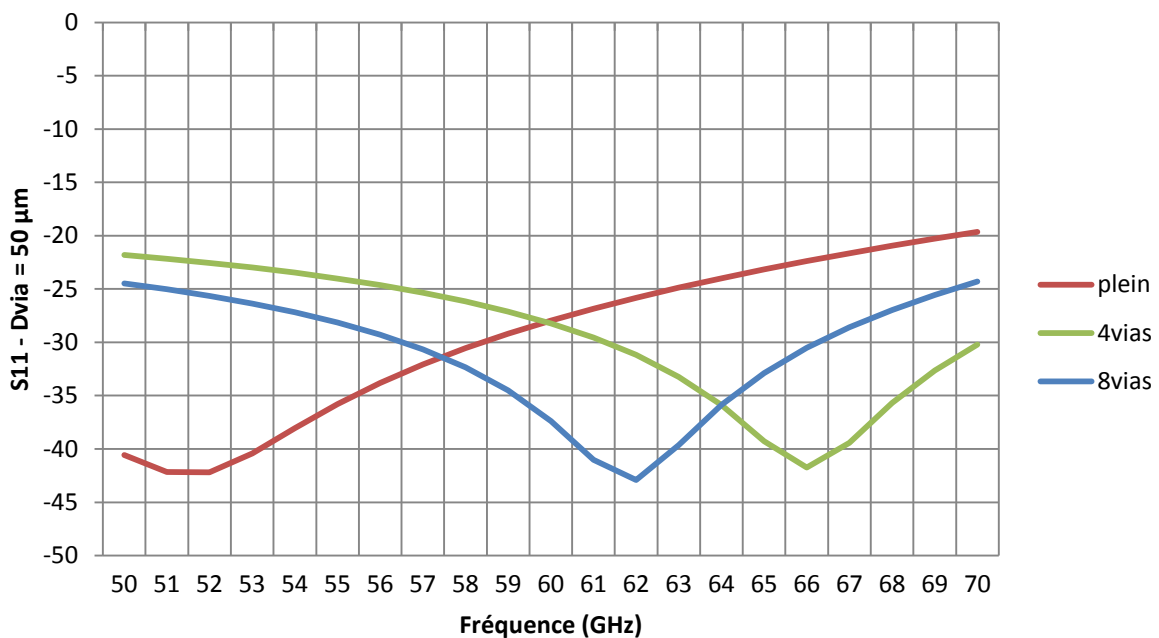


Figure 1-17 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 50 μm .

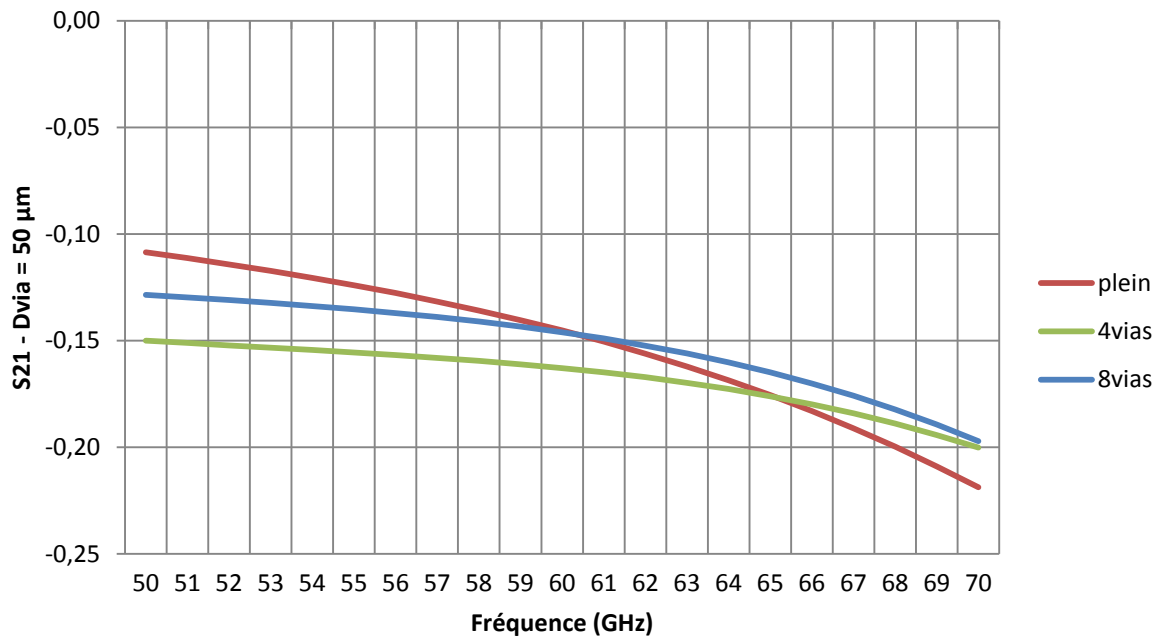


Figure 1-18 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de $50 \mu\text{m}$.

1.3.3 CAS n°3 : Diamètre de via de 75 μm .

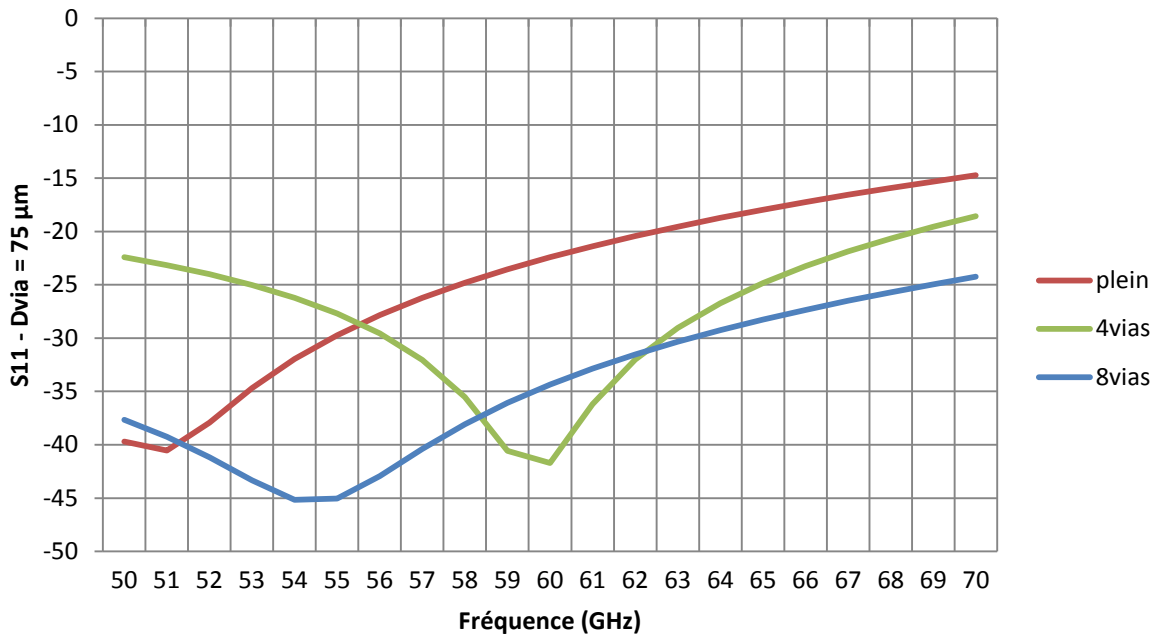


Figure 1-19 : Comparaison des coefficients de réflexion (S_{11}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 75 μm .

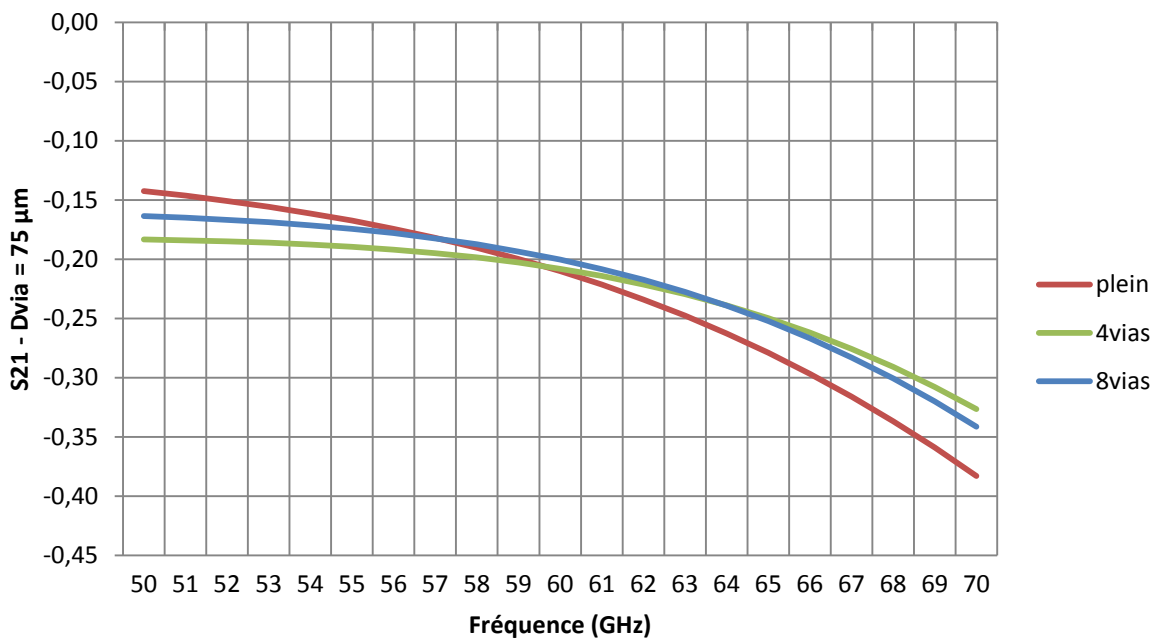


Figure 1-20 : Comparaison des coefficients de transmission (S_{21}) de la transition coaxiale silicium selon le type de plan de masse (plein, 4 vias, 8 vias) pour un diamètre de via de 75 μm .

RESUME

L'atteinte prévisible des limites de la loi de Moore dans les dix prochaines années poussent les concepteurs de systèmes de communication à intégrer le maximum de fonctionnalités dans des modules 3D de plus en plus petits, incluant des capteurs, de l'intelligence embarquée, des modules radio avec leurs antennes, (Approche More than Moore). On passe donc du concept de SoC (System-on-Chip) au concept de SiP (System-in-Package) pouvant intégrer des SoC mais offrant d'autres fonctionnalités au niveau de la perception de l'environnement, de la communication, de la reconfigurabilité et de la possibilité d'auto-organisation en réseau ad-hoc, tout en minimisant le volume et la consommation énergétique.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent ces travaux de thèse, qui présentent cette technologie d'intégration hétérogène (System-In-Package) miniature, faible coût associant des MEMS RF à des circuits MMIC actifs et des antennes intelligentes pour établir des communications robustes en gamme millimétrique. Pour cela, nous proposons, par le projet SIPCOM, la réalisation et le test d'un module radio ultra compact et performant en gamme millimétrique grâce à une l'approche d'« intégration hétérogène ».

Ce module intégrera toutes les fonctions nécessaires pour la réalisation d'un émetteur 60 GHz : le réseau d'antennes, les déphaseurs à base de MEMS pour assurer l'agilité du faisceau, le convertisseur DC/DC pour alimenter les MEMS, un FPGA (du commerce) pour commander la reconfigurabilité du module radio et les circuits mise en veille/réveil du module pour une consommation minimale. Dans ce contexte, ces travaux de thèse visent à développer la technologie de mise en boîtier et les interconnexions et transitions verticales.

Au cours de ce manuscrit, nous proposons une nouvelle approche de transitions verticales, les TSCV (Through Silicon Coaxial Vias). Transition verticale basée sur le modèle coaxial, utilisant du benzocyclobutène (BCB) en guise de matériau diélectrique, son étude, son développement, et l'évolution de la structure sont présentés. Du fait de sa nature, cette transition coaxiale offre tous les avantages à la mise en boîtier à haute densité d'intégration, avec une totale isolation électromagnétique par rapport au substrat, et donc une totale indépendance quant à la nature du substrat, un rayonnement électromagnétique parasites ultra faible et, par les propriétés du BCB, des pertes électromagnétiques ultra faibles en bande millimétrique. Nous détaillons également le procédé de réalisation technologique et son évolution, qui permet la fabrication et le test de ces structures.