

Mesures et modélisation RF de capacités MIM intégrées

J.-D. Arnould^a, F. Podevin^a, L. Vincent^b

^a RFIC-Lac, Université de Grenoble-Alpes, Grenoble, France

^b CIME Nanotech, Grenoble, France

Contact email : jean-daniel.arnould@grenoble-inp.fr

Il s'agit de former des étudiants de Master 2 et des ingénieurs en formation continue à la mesure RF sous pointes pour caractériser des capacités Métal-Isolant-Métal (MIM) intégrées sur un wafer. La problématique est d'obtenir le modèle électrique le plus fiable possible de ces capacités entre 40MHz et 26GHz tout en s'affranchissant des contraintes de mesures et des éléments d'accès RF à cette capacité.

I. Contexte

En hyperfréquence, il est nécessaire de connaître précisément le comportement des blocs élémentaires composant un circuit microélectronique en fonction de la fréquence. La capacité Métal-Isolant-Métal est pris ici comme exemple mais la méthodologie de mesure et d'extraction des paramètres électriques peut être appliquée à tout autre composant passif. La problématique essentielle lors de l'étape de mesure d'un composant élémentaire est de connaître ses caractéristiques propres et non celle du composant enrobé. En effet, toute mesure suppose un système d'instrumentation et de voies d'accès au composant qui sont autant d'éléments parasites dont il est préférable de s'affranchir. Une première étape consiste à calibrer l'appareil de mesure mais souvent cela ne suffit pas pour s'approcher au plus près du composant. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes. On peut éventuellement estimer et modéliser la participation des accès. Néanmoins il est souvent préférable de les mesurer afin de pouvoir s'en affranchir de la façon la plus propre possible. On parle alors d'épluchage ou de-embedding en anglais. Ce TP de 8 heures comporte 2 parties. Une première partie pratique qui a pour objectif de familiariser les étudiants avec les méthodes de calibration et d'épluchage en hyperfréquences (4 heures) et une deuxième partie qui est de trouver un modèle électrique équivalent à partir des mesures épluchées de tous ces éléments extérieurs (4 heures).

La Fig.1 montre quatre capacités MIM ayant été contacté à l'aide pointe de mesure GSG ayant un écartement de 100 μm . Nous observons les traces laissées par ces pointes de mesures sur les plots car la technologie utilisant du cuivre, il est nécessaire de percer la fine couche d'oxyde qui s'est créée naturellement en surface.

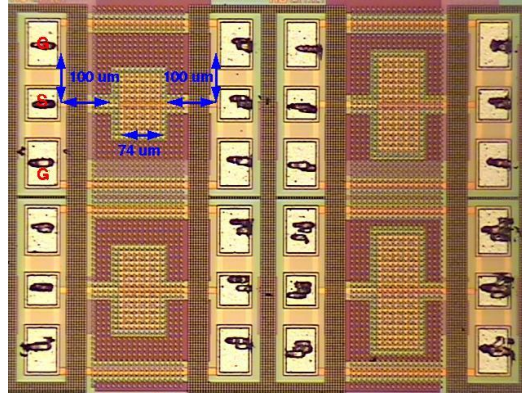


Fig.1. Quatre capacités MIM de longueur constante $L=74 \mu\text{m}$ et de largeur croissante de 43 à $136 \mu\text{m}$.

II. Descriptif de la technologie

Il s'agit d'un wafer 200 mm contenant entre autres les dispositifs testés dans le cadre de la formation. L'ensemble de ces dispositifs (lignes, open, short, thru, capacités diverses...) se trouve dans les zones hachurées sur la Fig.2.

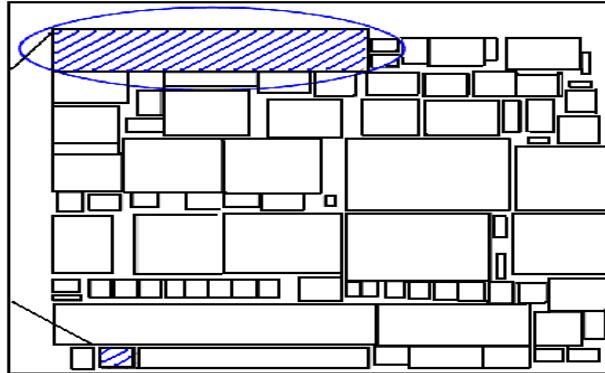


Fig.2. Plan du réticule du wafer. En hachuré, la zone étudiée.

La technologie utilisée est une technologie STMicroelectronics damascène HCMOS9 ($0,12 \mu\text{m}$). Elle est dotée de six niveaux de métallisation numérotés de M1 à M6 servant pour l'élaboration d'inductances ou de lignes de propagation. Un niveau de métal supplémentaire MIM5 entre M5 et M6 permet d'insérer les capacités entre M5 et MIM5, tel que représenté sur la Figure 3. Cette technologie utilise des interconnexions cuivre dans les niveaux supérieurs, ce qui permet de profiter de la haute conductivité de ce métal ($5,6 \cdot 10^7 \text{ S/m}$) pour les deux électrodes. L'électrode supérieure située au niveau MIM5 est connectée à sa ligne d'accès niveau M6 par des vias spécifiques alors que l'électrode inférieure située au niveau M5 est au même niveau que sa ligne d'accès. Entre les deux électrodes de cuivre se trouve le matériau diélectrique, ici du Si_3N_4 , d'épaisseur 32 nm, dont la permittivité relative théorique est $\epsilon_r=5,9$. L'avantage du processus damascène est qu'il est technologiquement compatible avec l'utilisation future de matériaux high-k (haute permittivité) dont l'utilisation est nécessaire pour augmenter les valeurs de capacité surfacique.

En dessous du niveau de métallisation M1 nous avons du Silicium de permittivité diélectrique $\epsilon_r=11,7$. Le SiO_2 a quant à lui une permittivité variable suivant sa densité (oxyde poreux ou non). Un oxyde dense a une permittivité diélectrique proche de 4. Un oxyde poreux peut descendre à 2. La valeur n'est pas connue ici.

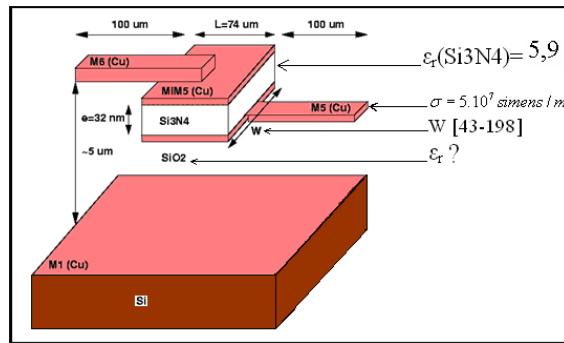


Fig.3. Capacité damascène entre M5 et MIM5 avec les lignes d'accès en M5 et M6.

III. Calibration et méthode d'épluchage

La toute première étape consiste en la calibration de l'analyseur vectoriel de réseaux (Anritsu VectorStar) au bout des pointes de mesures. Pour cela, nous utilisons un substrat commercial (Cascade Microtech) ISS 101-190 en alumine avec de l'or comme conducteur. L'or a l'avantage de ne pas s'oxyder et d'être facilement contacté par des pointes RF. La méthode de calibrage utilisée est classique (SOLT ou LRRM).

La deuxième étape consiste à utiliser une méthode de de-embedding pour s'affranchir des plots de contact et des lignes d'accès (100 μm). Afin d'éliminer les contributions de ces éléments sur les mesures de paramètres S, plusieurs méthodes sont disponibles. Dans le cas qui nous intéresse et aux fréquences considérées, les éléments parasites ont principalement un comportement **localisé** série ou parallèle, ce qui est illustré par la Figure 4. La méthode de Vandamme [1] est alors toute indiquée.

G_1 et G_2 représentent plus particulièrement les plots d'accès (couplage entre signal et masse au niveau de chaque plot).

Z_1 et Z_2 représentent plus particulièrement les lignes d'accès à la capacité MIM.

G_3 représente le couplage entre les ports 1 et 2 de la capacité MIM qui peut se produire naturellement si les lignes d'accès sont très proches l'une de l'autre.

Z_3 représente plus particulièrement le couplage entre les lignes d'accès et la masse. Ici la masse des plots d'accès est reliée par des vias à un plan de masse faisant écran au silicium et situé au niveau M1. Dans d'autres cas, c'est le chuck qui est relié à la masse de l'instrument de mesure et donc à la face arrière du substrat sur lequel est réalisée le dispositif.

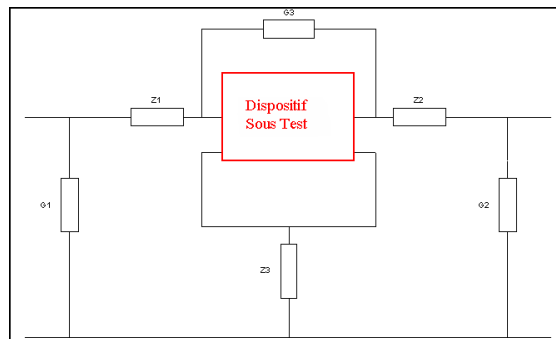


Fig.4. Impédances (Z_1 , Z_2 et Z_3) et Admittances (G_1 , G_2 et G_3) considérées comme éléments parasites autour du Dispositif sous Test.

La méthode de Vandamme consiste alors à déduire les impédances (Z_1 , Z_2 et Z_3) et admittances (G_1 , G_2 et G_3) à l'aide de 3 mesures complémentaires de paramètres S en remplaçant le Dispositif Sous Test par un circuit ouvert aux ports 1 et 2 (mesure OPEN),

un court-circuit aux ports 1 et 2 (mesure SHORT) et une transmission directe entre les ports 1 et 2 (mesure THRU). Le jeu de paramètres S ainsi obtenu permet alors de déduire à l'aide de transformation mathématique en matrices impédance et admittance tous les effets parasites modélisés sur la Fig.4. Cette méthode de de-embedding est très liée à la modélisation des parasites que l'on suppose être autour du DST. Les étudiants se rendent compte que les effets des éléments parasites (plot de connexion et lignes d'accès) augmentent avec la fréquence et qu'ils sont loin d'être négligeables comme le montre la Fig.5.

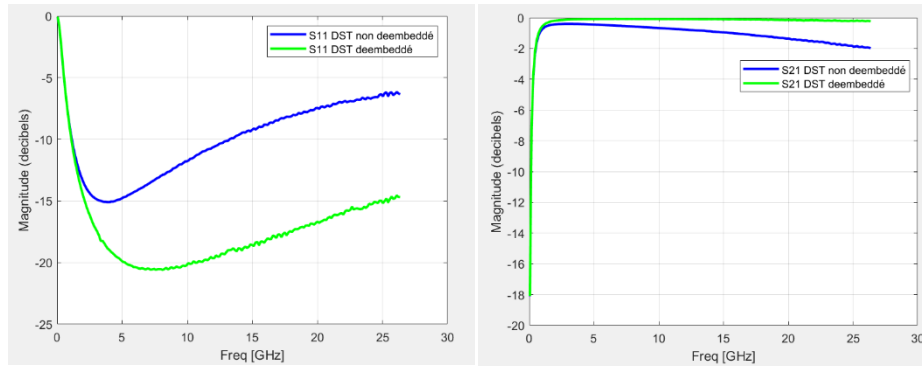


Fig.5. Paramètres S mesurés de-embeddés et non de-embeddés.

IV. Modélisation électrique de la capacité MIM

Le modèle équivalent d'une capacité MIM est représenté sur la Fig.6 :

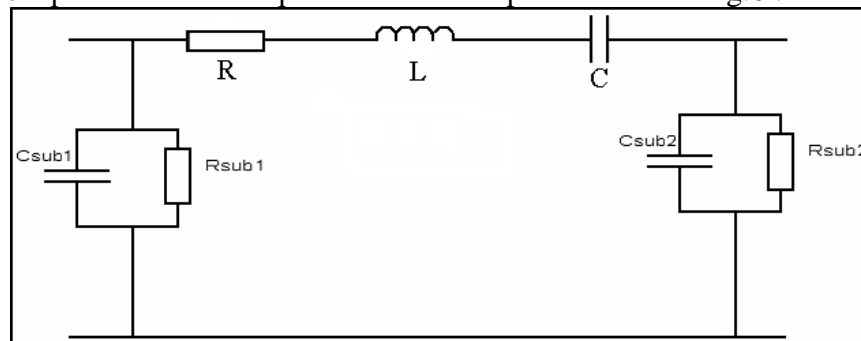


Fig.6. Modèle électrique équivalent des capacités MIM.

Ce schéma en Π est composé de deux parties disjointes :

- *En série* : Une inductance et une résistance traduisant les effets inductifs et résistifs que peuvent avoir les armatures conductrices de la capacité MIM, et notre capacité effective traduisant la capacité avec l'empilement de 32 nm de Si_3N_4 . Les pertes diélectriques dans cet empilement peuvent être considérées comme nulles. Ce qui permet de simplifier le modèle électrique en un simple circuit résonnant RLC,

- *En parallèle* : Comme les mesures sont réalisées avec M1 comme plan de masse, seule l'influence du substrat SiO_2 , situé entre les niveaux de métallisation M1 et M6, se fait ressentir. Les effets du substrat se modélisent dans le cas général par une capacité d'oxyde (SiO_2) C_{sub} et par une résistance R_{sub} , tenant compte des pertes diélectriques. Le modèle RC parallèle est donc plus judicieux.

V. Procédure d'extraction des éléments du schéma équivalent

Le schéma de la Fig.6 est assimilable à celui en Π de la Fig.7. En explicitant les équations reliant les paramètres Y_{ij} des mesures épluchées aux éléments Y_1, Y_2, Y_3 , on peut déterminer plus précisément le modèle équivalent de la capacité MIM.

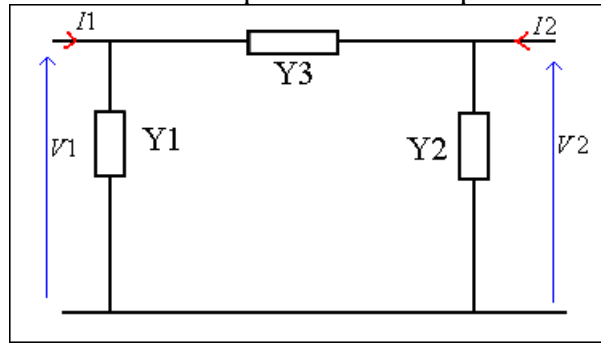


Fig.7. Modèle équivalent en π de la capacité MIM dé-embeddée.

On assimile la matrice Y obtenue à partir de la matrice S épluchée à la matrice Y du schéma de la Fig.7 :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_3 & -Y_3 \\ -Y_3 & Y_2 + Y_3 \end{bmatrix} \quad [1]$$

On en déduit :

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12} \quad [2]$$

$$Y_2 = Y_{21} + Y_{22} \quad [3]$$

$$Y_3 = -Y_{12} \quad [4]$$

Après l'obtention de ces équations, il s'agit d'implémenter le modèle sous le logiciel Keysight ADS afin de visualiser les courbes de réponse des paramètres voulus. L'équation Y_3 représente l'admittance totale des éléments séries composant la capacité mesurée. On peut alors faire varier C, L et R de façon à ce que le paramètre Y_3 simulé converge vers le paramètre Y_3 des mesures épluchées. On peut appliquer la même méthode avec Y_1 et Y_2 pour trouver les valeurs restantes de C_{Sub1} et R_{Sub1}, C_{Sub2} et R_{Sub2} .

VI. Résultats et discussion

Voici les résultats que nous obtenons :

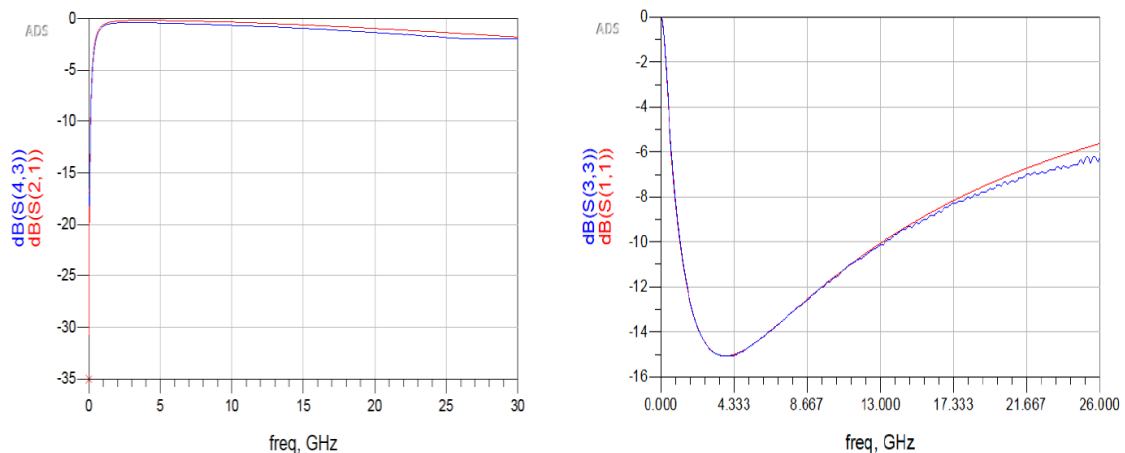


Fig.8. Paramètres de transmission (à gauche) et de réflexion (à droite), en rouge la simulation, en bleu la mesure de la première capacité MIM ($74 \times 43 \mu\text{m}^2$).

Les courbes étant en bon accord, cela signifie que le modèle en π est validé et que les valeurs numériques extraites sont correctes. Cet exercice d'extraction peut être fait pour plusieurs capacités de tailles différentes afin d'en extraire la capacité surfacique qui est propre à la technologie de $C=1.6 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ et en bon accord avec la formule théorique ϵ/ϵ_0 . Les étudiants peuvent extraire un tableau de valeurs avec une incertitude d'extraction :

Tableau I : Extraction des paramètres pour la première capacité MIM

R (Ω)	L (pH)	C (pF)	Csub1 (fF)	Rsub1 (k Ω)	Csub2 (fF)	Rsub2 (k Ω)	Fc (GHz)
0.3 \pm 0.1	14 \pm 1	4.3 \pm 0.1	45 \pm 20	10 \pm 5	41 \pm 20	50 \pm 10	21 \pm 1

Il est intéressant de faire ajuster à la main les paramètres aux étudiants pour qu'ils puissent avoir une idée de la précision des paramètres extraits. Ici les éléments parallèles sont extraits avec une plus forte imprécision que les éléments série.

Sur certaines capacités, les étudiants ont extrait des valeurs de résistances série négatives car en fait il ne faut pas oublier que les mesures de-embeddées proviennent de mesures sur lesquelles il est possible de ne pas avoir exactement le même posé de pointes d'une structure à l'autre. En effet, la méthode de Vandamme demande une reproductibilité de la mesure entre *le open*, *le short*, *le thru* et le DST. Si par exemple, sur *le short*, les pointes sont moins bien posées que sur le DST, des pertes série supplémentaires peuvent être retirées lors de la procédure de de-embedding à cause de cela. On parle alors de over-embedding qui amène à des valeurs erronées de paramètres extraits.

Remerciements

Nous remercions l'entreprise STMicroelectronics qui nous a donné ce wafer à la suite d'une activité de recherche avec notre laboratoire et qui sert maintenant à former nos étudiants.

Références

1. E. Vandamme, D. Schreurs, and C van Dinther, "Improved Three-Step De-Embedding Method to Accurately Account for the Influence of Pad Parasitics in Silicon On-Wafer RF Test-Structures", *IEEE Transactions On Electron Devices*, Vol. 48, No. 4, April 2001