

Élaboration et caractérisation de matériaux « high-k » et « medium-k » et leur intégration dans des capacités Métal-Isolant-Métal de circuits intégrés avancés

Bertaud Thomas

IMEP-LAHC : Institut de Microélectronique, Electromagnétisme et Photonique –
Laboratoire d’Hyperfréquences et Caractérisation

LTM : Laboratoire des Technologies de la Microélectronique

Directeur de thèse : Mr Bernard Fléchet (IMEP-LAHC)

Co-directeurs : Mr Cédric Bermond (IMEP-LAHC) et Mr Christophe Vallée (LTM)

Projet « Mini-Π »

Sommaire

1. Contexte
 - « System on Chip » et « System in Package »
 - Le projet « Mini-IT »
2. Objectifs de la thèse
3. Organisation du travail de thèse
 - Travail « amont »
 - Travail « aval »
4. État d'avancement
5. Résultats intermédiaires
 - Caractérisations du ZrO_2 , de l' HfO_2 et de l' AlN
 - Réalisation de dispositifs à la PTA
6. Conclusions et perspectives

Contexte

SoC / SiP

Intégrer toutes les fonctions (analogiques et numériques) au sein d'un même circuit

Composants passifs

Directement intégrés dans la puce

Interconnexions

Résistances

Capacités

Inductances

« Métal / Isolant / Métal »

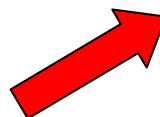
Applications visées

- Capacités RF
- Capacités RF accordables
- Capacités de découplage
- Mémoires DRAM

Spécifications ITRS

Roadmap ITRS pour les capacités MIM RF	2008	2010 2012	2013 2015	2016 2018
Génération technologique (nm)	65	45	32	22
Densité $\text{fF}/\mu\text{m}^2$	4	5	7	10
Fuites (nA/cm^2)	10	10	10	10
Linéarité en tension ($\text{ppm}\cdot\text{V}^{-2}$)	< 100	< 100	< 100	< 100
Q (à $f=5\text{ GHz}$ pour 1 pF)	> 50	> 50	> 50	> 50

- Augmenter la densité surfacique
- Conserver d'excellentes caractéristiques électriques



Nouvelles architectures
« 2D » ou « 3D »

Augmentation de la surface de la capacité

Nouveaux matériaux
« High- κ » et « Medium- κ »

Augmentation de la permittivité du matériau

Le projet « Mini- Π »

• Objectifs du projet :

- l'élaboration et la caractérisation physique et HF de matériaux de permittivité élevée en vue de leur intégration dans des composants passifs fortement intégrés,
- d'étudier, c'est à dire modéliser, concevoir puis tester de nouvelles architectures de composants passifs élémentaires tirant profit de ces matériaux (principalement les capacités MIM 2D et 3D).

• Partenaires :



IMEP-LAHC
(Université de Savoie)
- Porteur du projet
- Caractérisation HF des matériaux,
- Caractérisation, conception et optimisation des composants



LTM
(CEA-CNRS-INPG-UJF)
- Élaboration et dépôt des matériaux
- Caractérisation physique et électrique
- Élaboration de capacités 2D



G2Elab
(CNRS-INPG-UJF)
- Caractérisation physique et électrique BF



LETI (CEA)
- Élaboration et dépôt des matériaux High-K



STMicroelectronics
- Élaboration et dépôt des matériaux médium-K.
- Élaboration de capacités 3D.



SILVACO :
- Développement des outils de modélisation électromagnétique

Objectifs de la thèse

- Objectif 1 :

Elaborer et caractériser physiquement, électriquement et en hautes fréquences (de manière « in-situ ») les matériaux à forte permittivité en vue de leur intégration dans des capacités MIM 2D ou 3D.

- Objectif 2 :

Modélisation, conception, test DC et HF de capacités MIM et optimisation de leurs architectures et de leur interconnexion en regard des applications visées.

- Objectif 3 :

Proposer des solutions concrètes en terme de matériaux pour des applications RF

Renforcer les échanges entre les principaux partenaires du projet (IMEP-LAHC, LTM, Leti et STMicroelectronics).

Travail « amont »

*Matériaux « high-k et « medium-k » :
Élaboration et caractérisation*



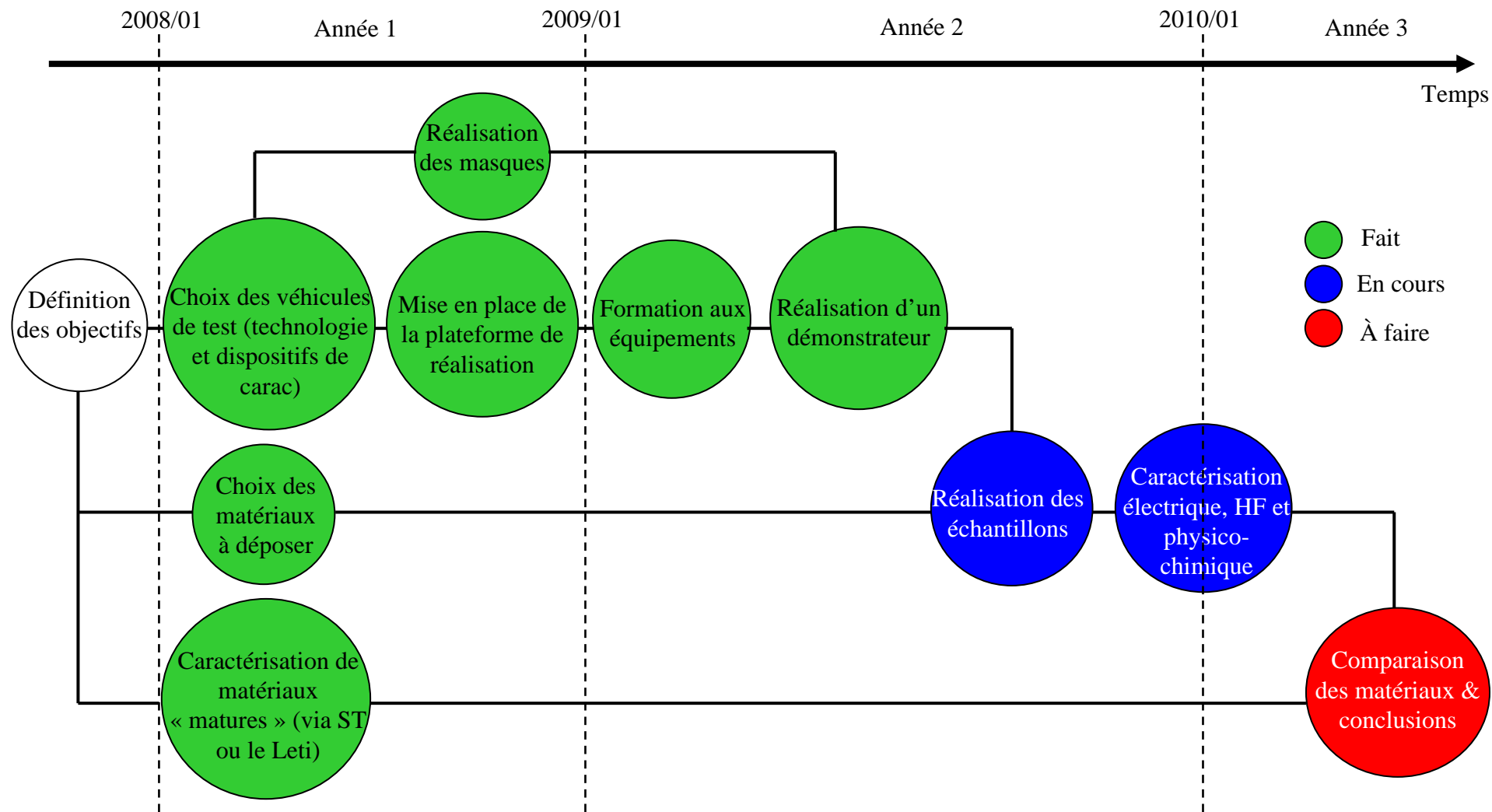
- Mise en place d'une technologie complète (dépôts / gravures) pour la réalisation des dispositifs
- Caractérisation « en ligne »

- Réalisation d'un jeu de 3 masques dédié à la caractérisation très large bande (de 10^{-3} Hz à 40 GHz)
- Caractérisation électrique des oxydes déposés

Travail « aval »

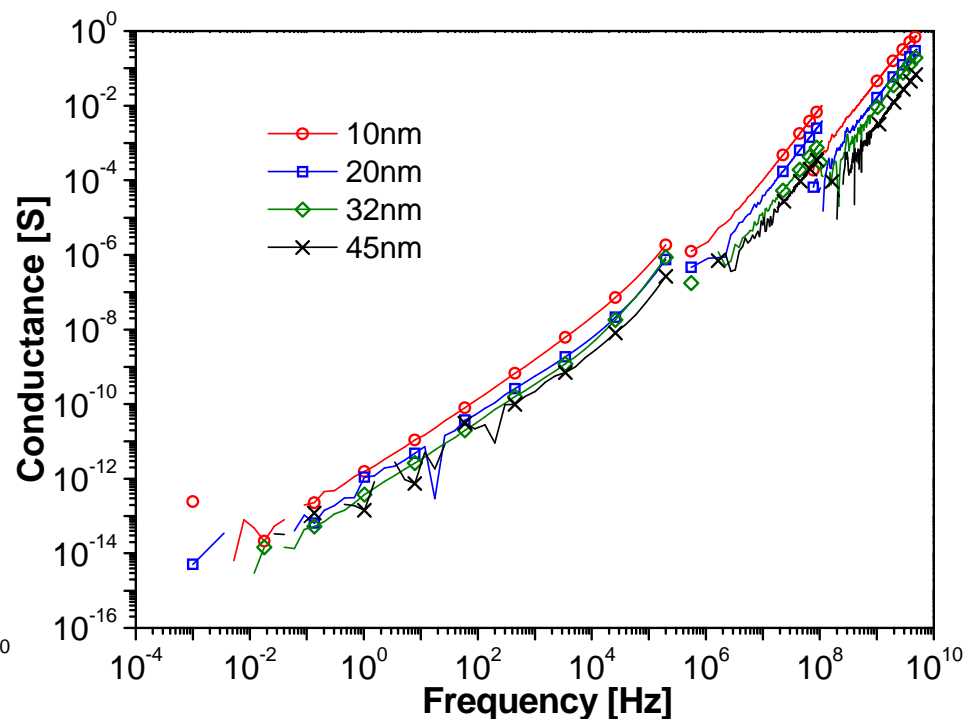
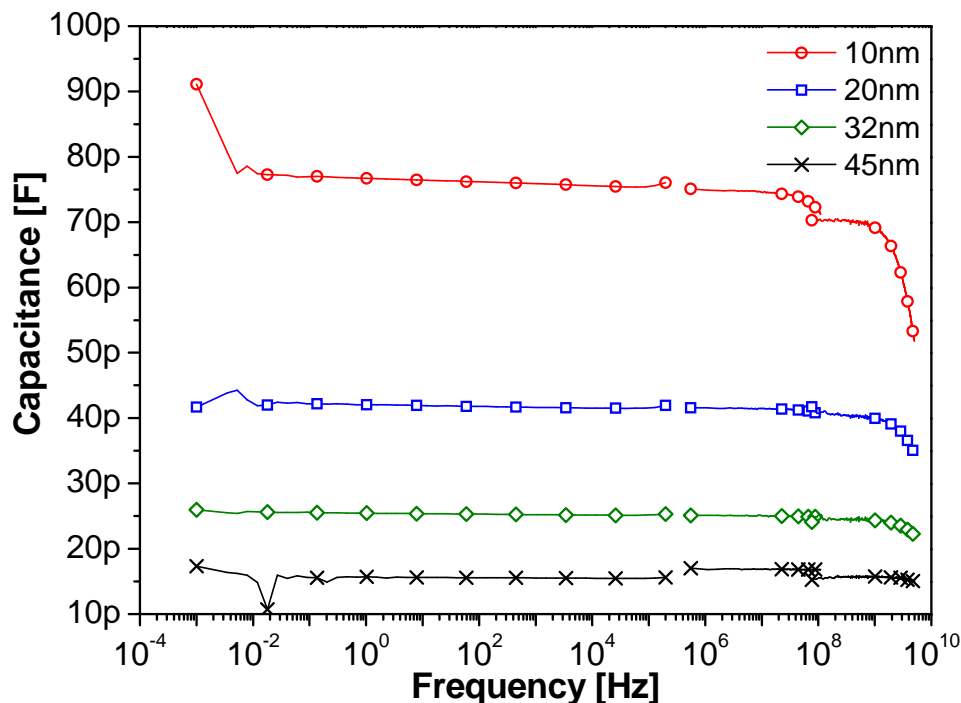
- Caractérisation de plaques fournies par STMicroelectronics et le Leti, en parallèle au travail de recherche « amont »
 - Des résultats intéressants obtenus pour le ZrO_2 , l' HfO_2 (STMicroelectronics) et l' AlN (Leti)

État d'avancement



Résultats : ZrO₂ (1)

- Plaques fournies par STMicroelectronics...

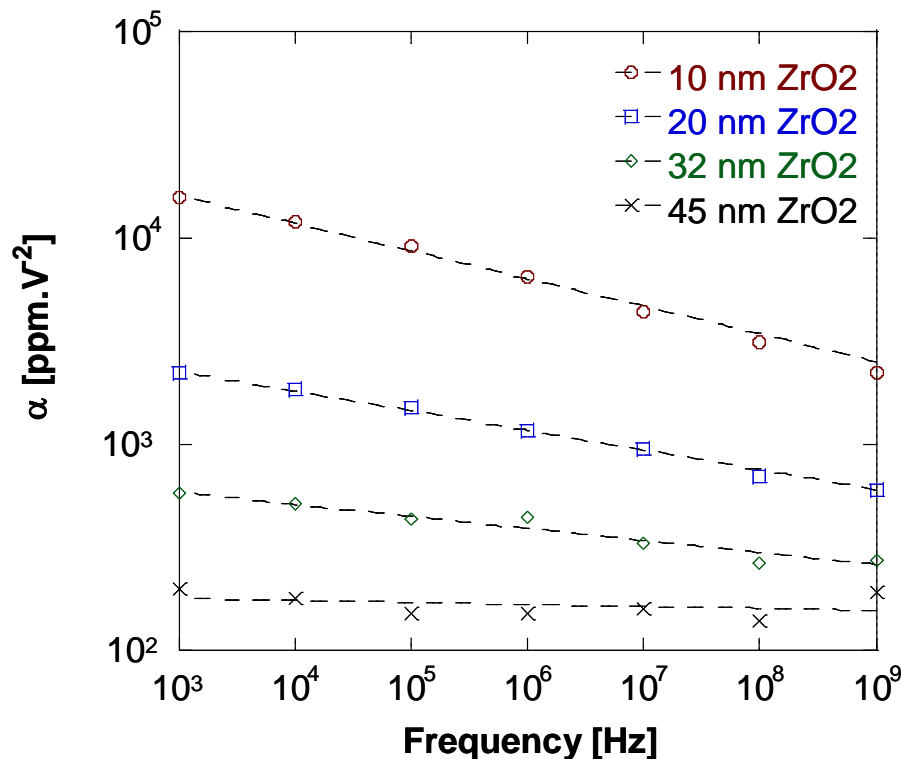


- Extraction de la capacité C et de la conductance G de 10⁻³ Hz à 5 GHz en couplant 3 appareils de mesures distincts.
- Permittivité extraite de l'ordre de 31 et tangente de pertes comprise entre 2.10⁻³ (en BF) et 2.10⁻¹ (en HF)

Résultats : ZrO₂ (3)

- Mise en évidence de l'effet de la fréquence sur la linéarité en tension des capacités MIM :

- Extraction du paramètre caractéristique α :
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C(V) - C_0}{C_0} = \alpha V^2 + \beta V$$

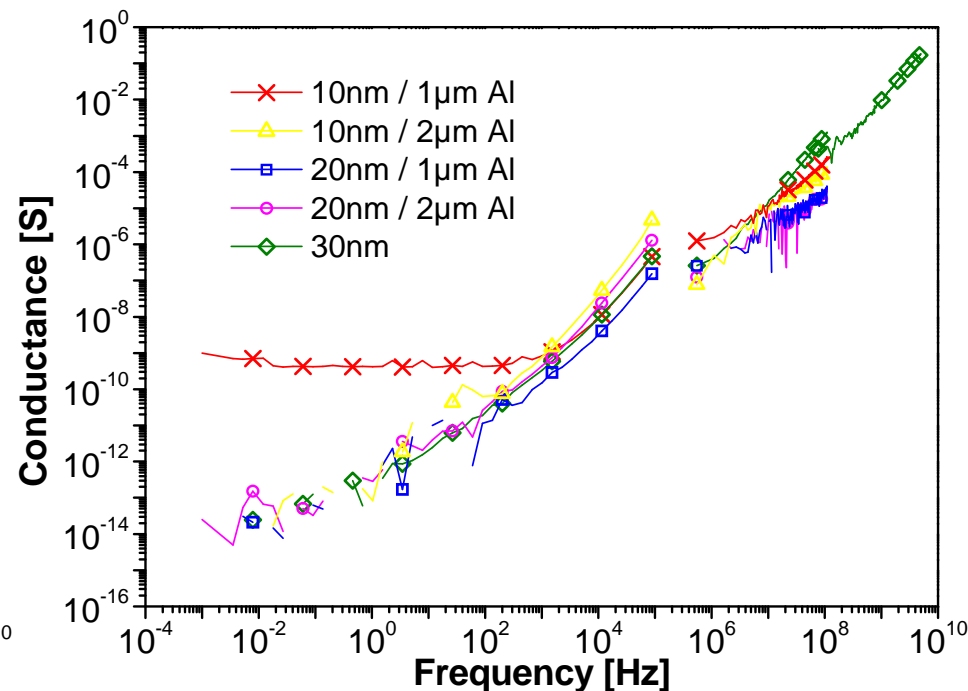
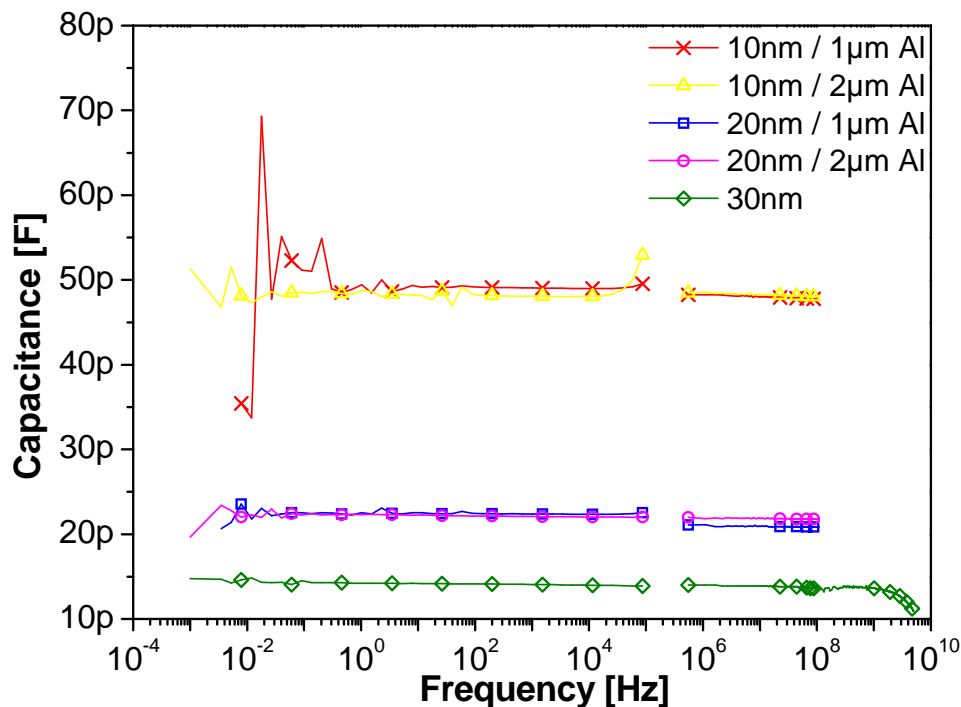


Cet effet n'a jamais été caractérisé jusqu'à de si hautes fréquences.

Compréhension des phénomènes entrant en jeu dans ce comportement difficile.

Résultats : HfO₂

- Plaques fournies par STMicroelectronics...



- Extraction de la capacité C et de la conductance G de 10⁻³ Hz à 5 GHz en couplant 3 appareils de mesures distincts.
- Permittivité extraite de l'ordre de 20 et tangente de pertes comprise entre 5.10⁻² (en BF) et 5.10⁻¹ (en HF)

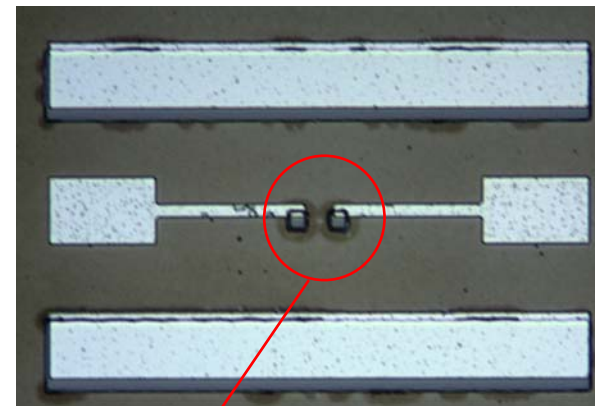
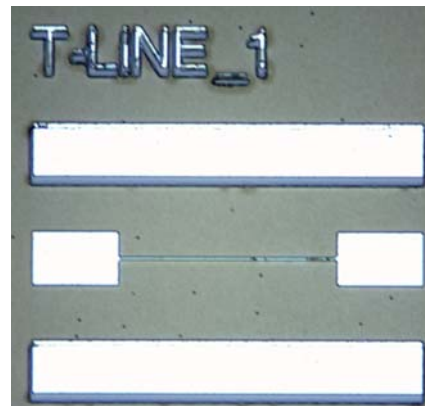
Résultats : AlN (1)

- Plaques fournies par le Leti et dispositifs réalisés à la PTA...

Empilement



Résultats

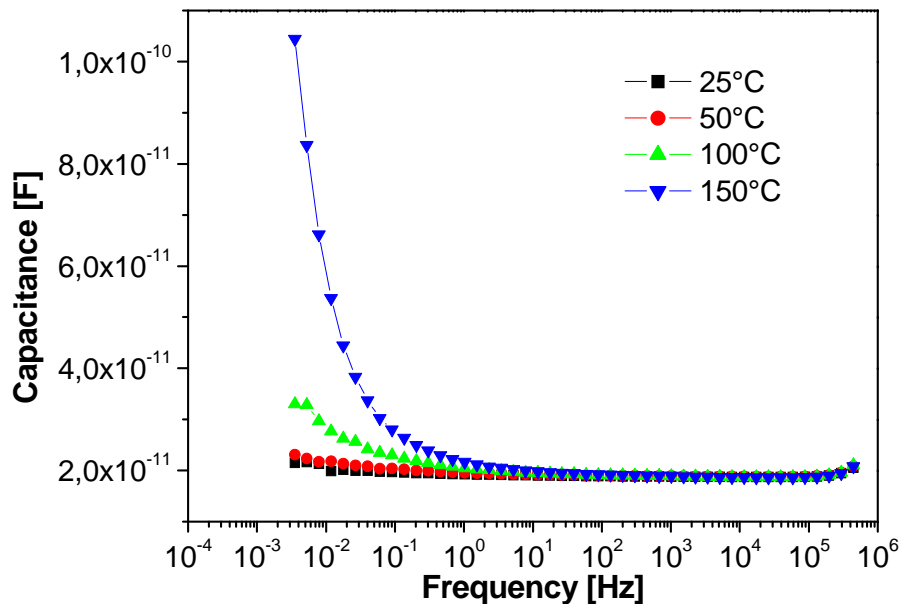


Procédés réalisés

- Gravure IBE de l'AlN (masque 2),
- Dépôt Al par évaporation,
- Gravure chimique de l'Al après photolithographie (masque 3).

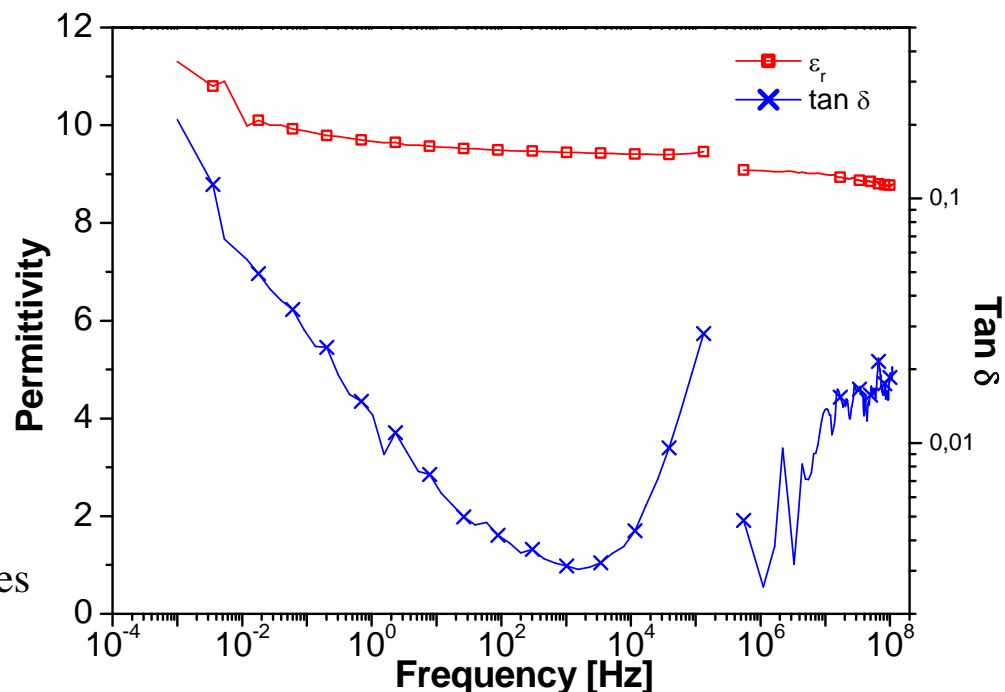


Résultats : AIN (2)



- Permittivité extraite de l'ordre de 9.
- La remontée des pertes vers 10^{+5} Hz est une aberration de mesure (limites de l'appareil)
- Les premières mesures en HF concordent avec ces résultats BF (permittivité et tangente de pertes)

- Relaxation du matériau vers les très basses fréquences bien mis en évidence en chauffant l'échantillon.



Production scientifique

- 1 papier en cours d'impression dans la revue « *Microelectronic Engineering* »
- 1 lettre soumise à « *IEEE Electron Device Letters* »
- 3 conférences internationales :
 - « *Advanced Metallization Conference* » (AMC) 2008
 - « *Materials for Advanced Metallization* » (MAM) 2009
 - « *Asia Pacific Microwave Conference* » (APMC) 2009
- 4 conférences nationales :
 - JNM 2009
 - JFMMA 2009
 - JNRDM 2008 & 2009

Conclusions & Perspectives

- Deux matériaux ont été caractérisés et les résultats valorisés :
 - ZrO_2 :
 - Extraction de la permittivité et des pertes du matériau de 10^{-3} Hz à 5 GHz,
 - Effet de la fréquence sur la linéarité en tension des capacités MIM mis en évidence
 - HfO_2 :
 - Mise en évidence de l'effet de la rugosité de l'électrode inférieure sur les performances électriques du composant
 - Extraction de la permittivité et des pertes du matériau de 10^{-3} Hz à 5 GHz
- Deux matériaux sont en cours de caractérisation ou d'élaboration :
 - AlN : caractérisation HF en cours
 - Si_3N_4 : réalisation à la PTA terminée, caractérisations en cours
- Nombreuses perspectives grâce aux masques test et couplées à la technologie mise en place à la PTA :
 - TiO_2 et TiTaO : en partenariat avec l'IMN de Nantes
 - Al_2O_3 avec le Leti
- Une excellente collaboration entre le LTM, l'IMEP-LAHC, le Leti et STMicroelectronics

Merci de votre attention

