

# frecn|sys

**Frequency Components and Systems**

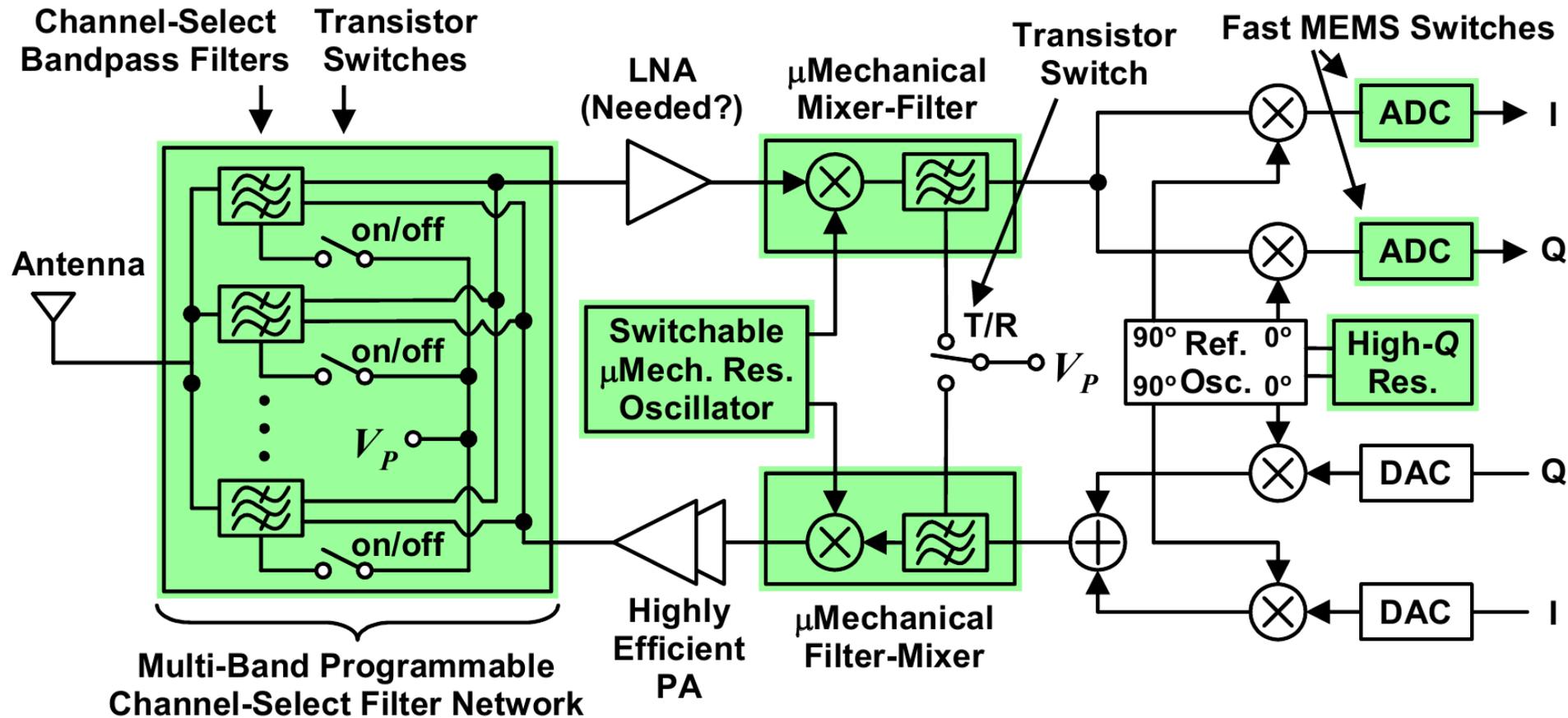
TEMIS Innovation  
18 Rue Alain Savary 25000 Besançon  
Tel. (direct) : +33 (0) 3 81 25 53 63  
Fax. : +33 (0) 3 81 25 53 51

[contact@frecnsys.fr](mailto:contact@frecnsys.fr)  
[www.frecnsys.com](http://www.frecnsys.com)

---

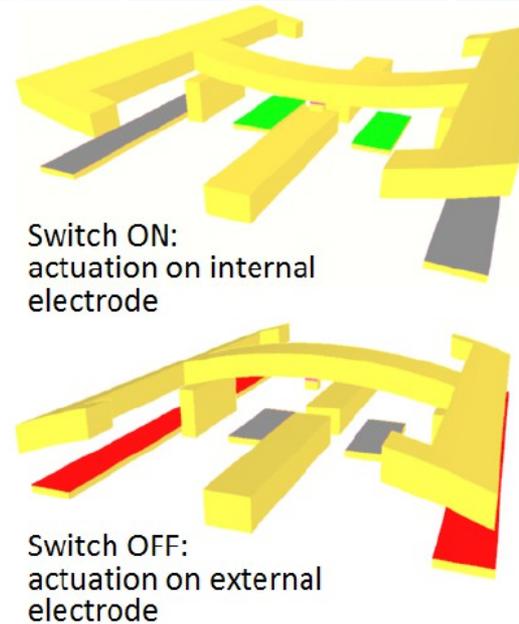
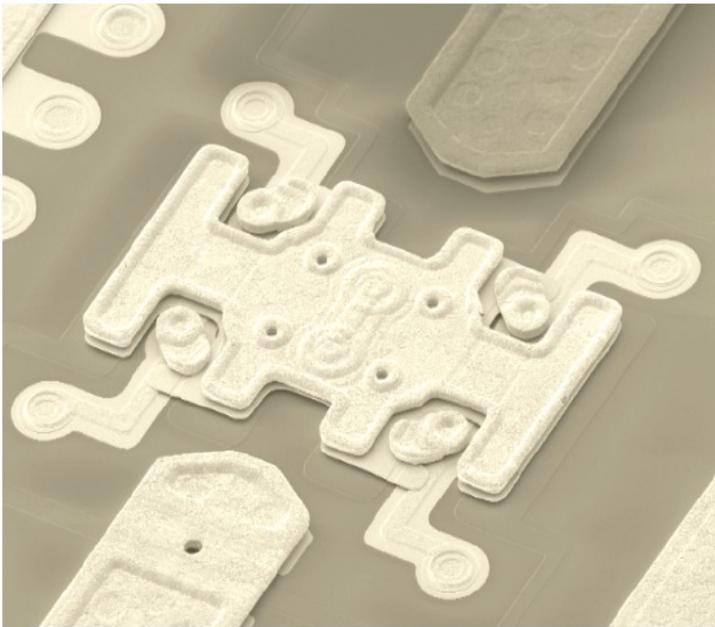
- Plan de la présentation

- Enjeux des Composants MEMS-RF et problématiques Temps-Fréquence
  - Oscillateurs locaux – compacité et bruit de phase
  - Filtres de fréquence – bandes modulaires, pertes minimales, montée en fréquence
  - Capteurs à sortie de fréquence – compacité, précision, télé-opérabilité
- Dispositifs types et technologies associées
- Exemples de mise en œuvre
  - Résonateurs SAW : technologie actuelle et perspectives
    - Oscillateurs
    - Filtres
  - Résonateurs BAW : résonateur à harmoniques multiples
  - Résonateur à structures vibrantes : exemple d'un oscillateur intégré sur substrats de type SOI de Si-Time
- Conclusion - perspectives



in C. T.-C. Nguyen, "Vibrating RF MEMS overview: applications to wireless communications", Photonics West: MOEMS-MEMS 2005, San Jose, California, Jan. 22-27, 2005, pp. 11-25.

Les composants surlignés n'existaient pas en 2005 mais en 10 ans, seuls quelques exemples sont apparus sur le marché



Switches façon Delfmems

Lourds investissements pour le marché des objets portables

Commutateurs façon Airmems

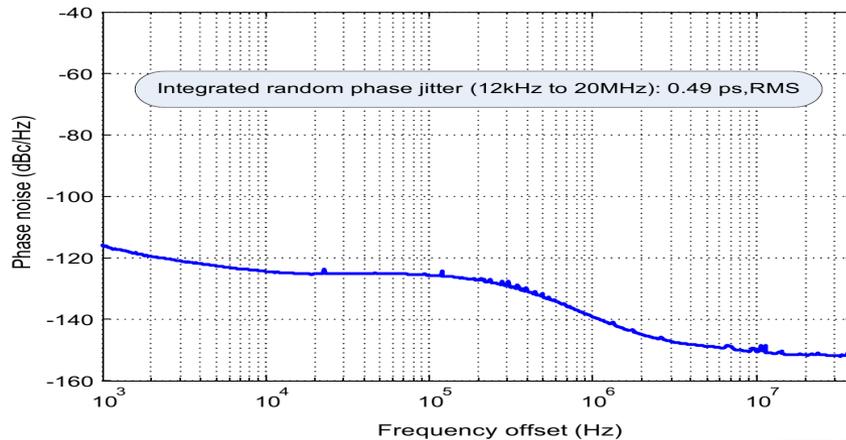
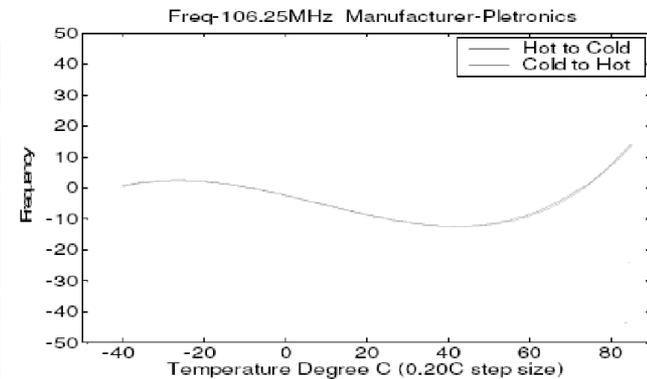
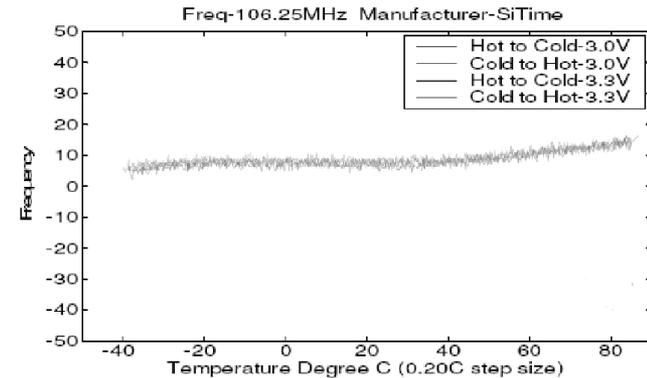
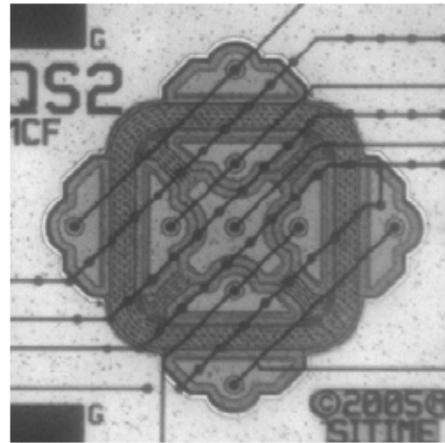
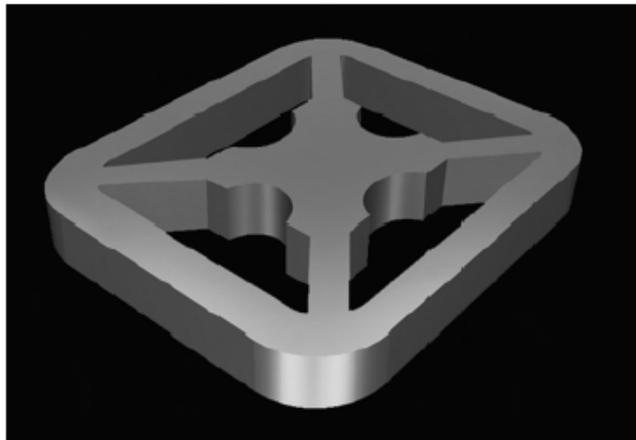
Applications stratégiques

in Olivier Millet, Igor Lalicevic, "The RF MEMS Switch is a Solution for the LTE Advanced Standard"  
DelfMEMS, white paper, 2013 at <http://www.delfmems.com>

and in Romain Stefanini, AirMEMS at <http://www.airmems.com>

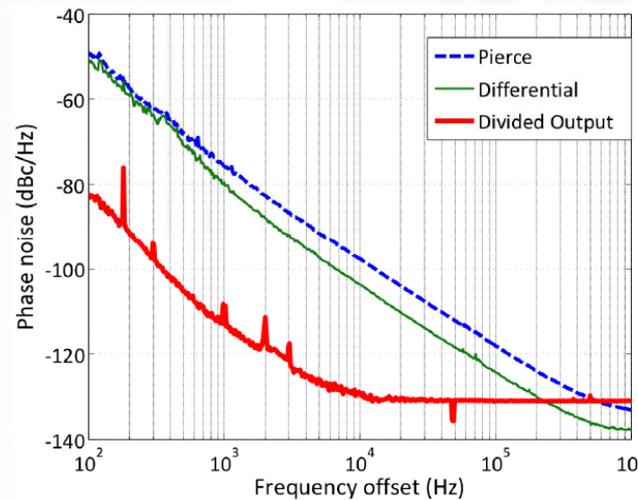
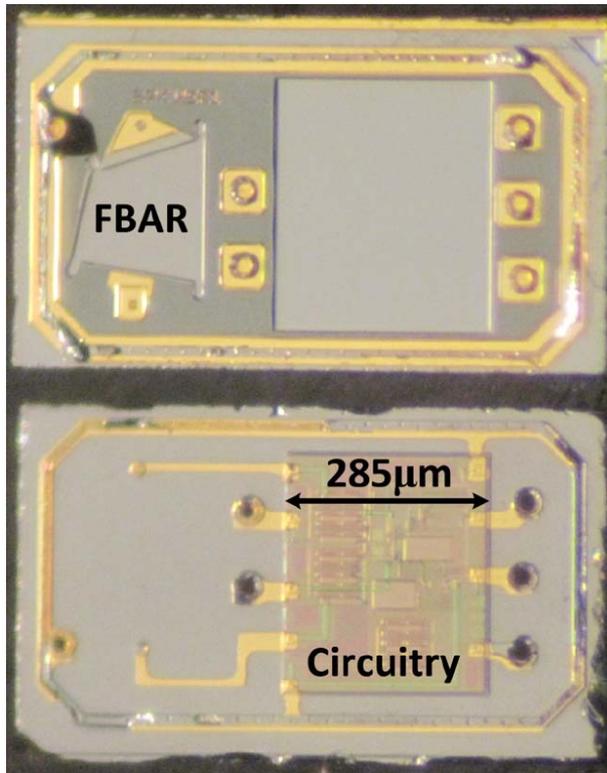
Des composants en phase d'industrialisation à fort potentiel, dont le vieillissement et les tensions de commutations sont en cours de qualification

# Exemple de MEMS-RF : Si-Time et l'oscillateur tout-Si

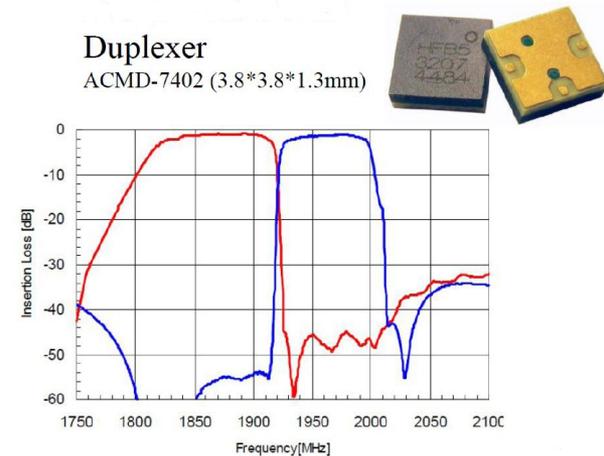


in C. Lam, "A Review of the Recent Development of MEMS and Crystal Oscillators and Their Impacts on the Frequency Control Products Industry", Invited Paper, 2008 IEEE Int'l Ultrasonics Symposium, Beijing, 2008.

Une véritable mise en œuvre industrielle pour un produit dont les avantages sont essentiellement fondés sur le contrôle électronique et non sur les qualités intrinsèques du résonateur



Bruit de phase de l'oscillateur hybride

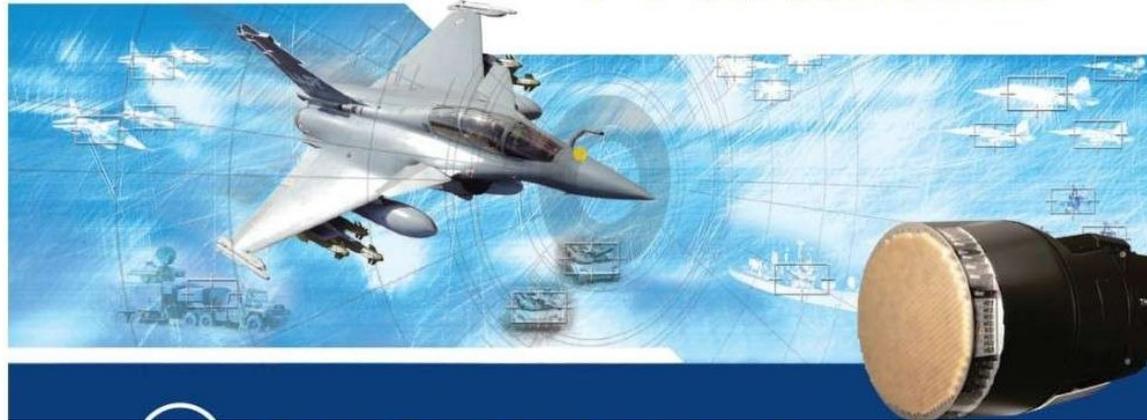


Duplexeur à base de résonateurs FBAR

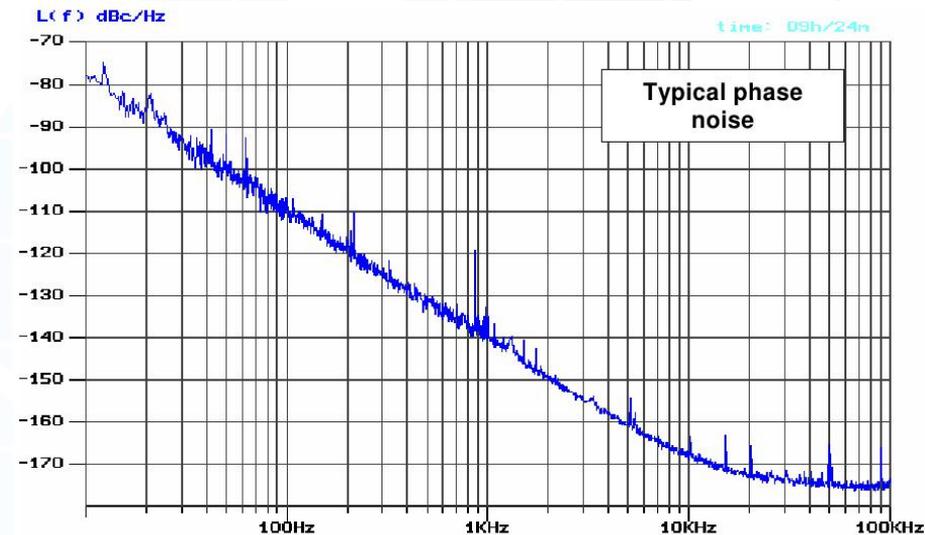
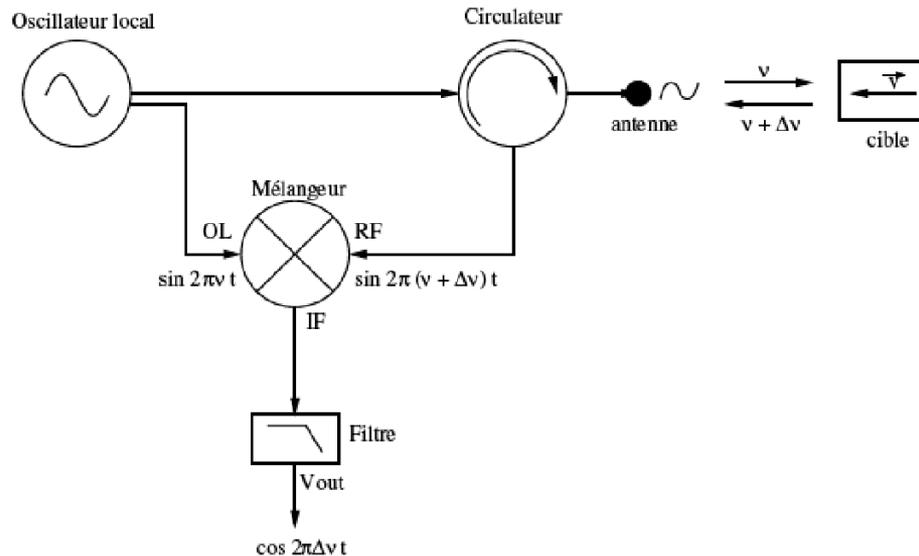
in M. Small & al, "Wafer-scale Packaging for FBAR-based Oscillators" accessible at <http://wireless.ee.washington.edu/wp-content/uploads/sites/17/2013/03/SmallFCS2011.pdf>

Un exemple de combinaison hybride de RF-MEMS à base de films piézoélectriques d'AlN et d'une électronique embarquée, commercialement viable

## THALES



Les enjeux de qualité prédominent sur l'aspect coût (toujours présent cependant). Les solutions « Grand Public » répondent généralement mal aux critères imposés dans ce cadre



# Ondes élastiques de surface

## ■ SAW, « *Surface Acoustic Wave* »

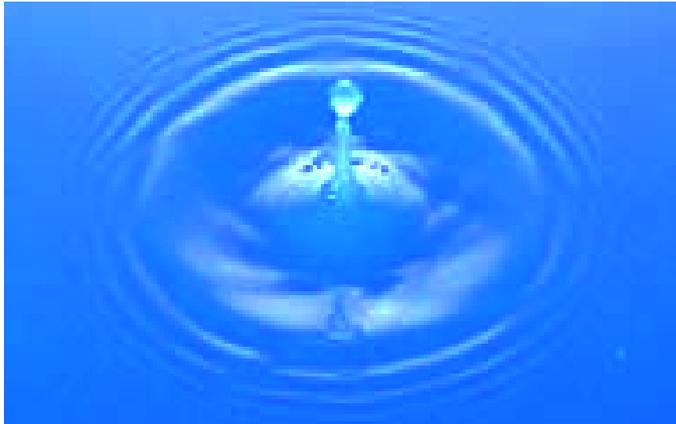
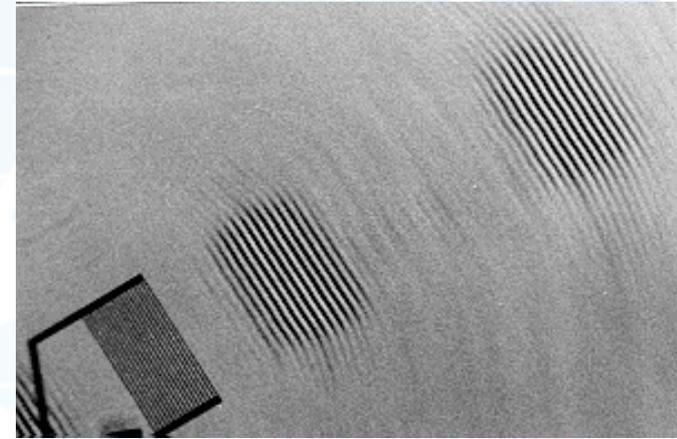
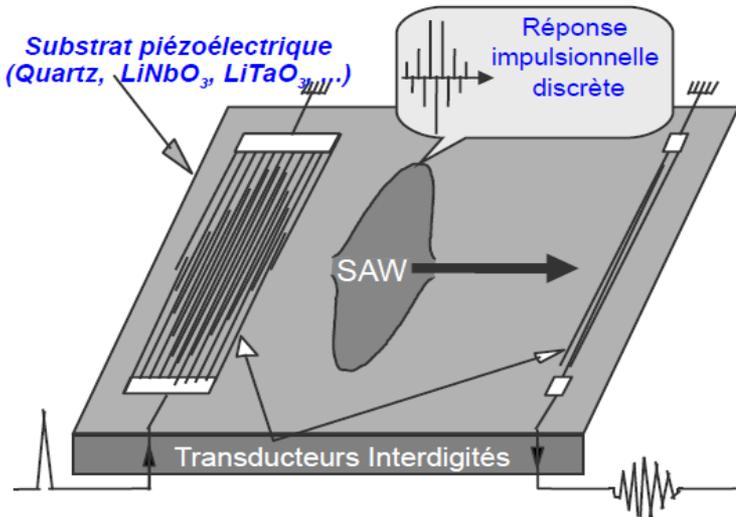


Image naïve d'une onde de surface guidée

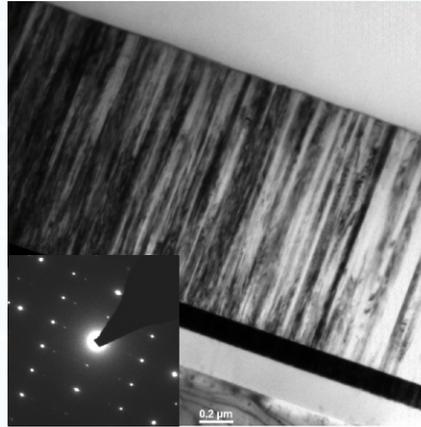
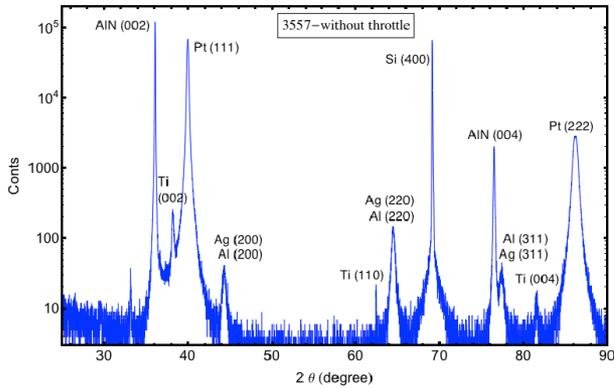


Propagation SAW par stroboscopie

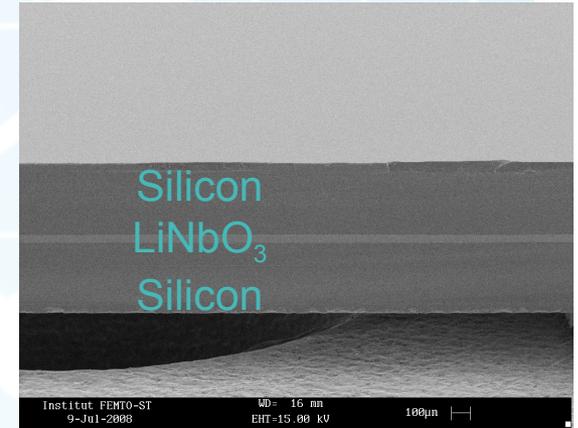


Dispositifs SAW développés sur monocristaux piézoélectriques (quartz, LGS,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ), réputés non intégrables, non accordables et incompatibles avec les technologies CMOS sur silicium

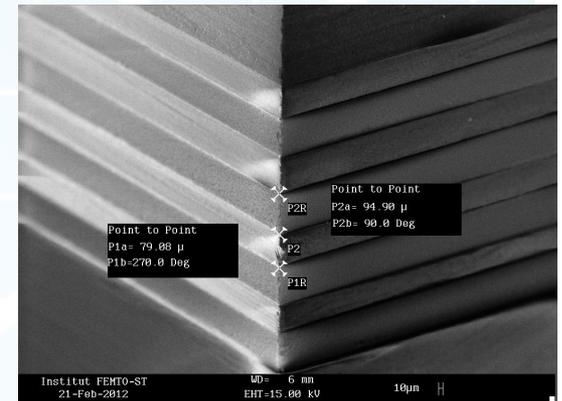
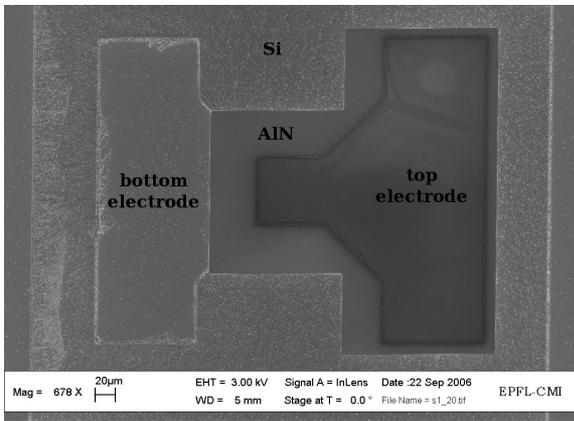
*Sont-ce des MEMS ?  
Qu'en est-il exactement ?*



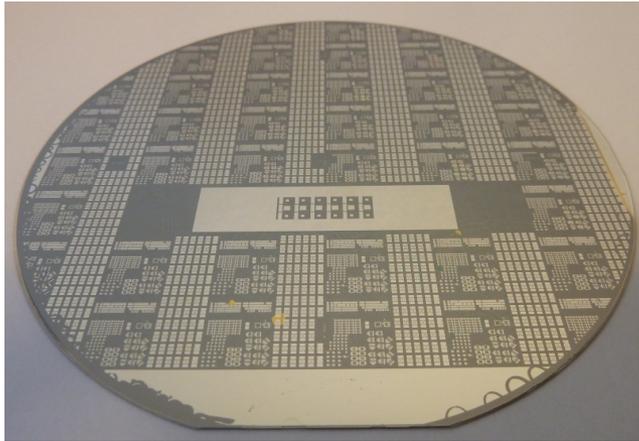
Technologie de wafer composite  
Nouveaux wafers  
Nouvelles structures



Films de nitrure d'Aluminium  
(Caractérisation réalisée à l'EPFL par P. Muralt)



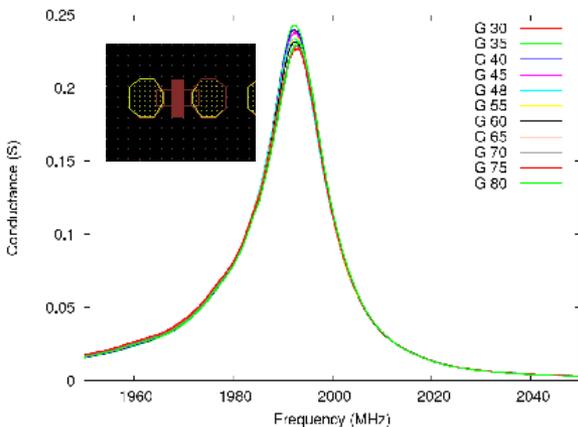
Résonateurs HBAR  
Sources de fréquence et capteurs



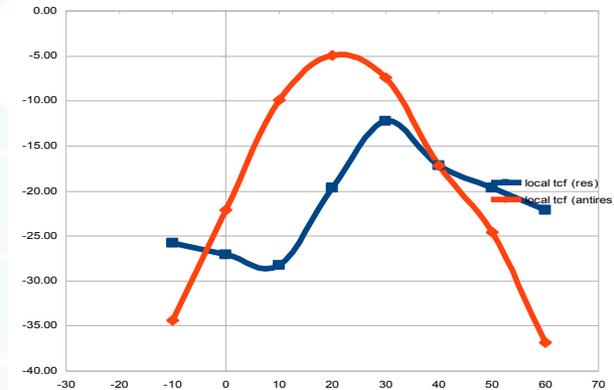
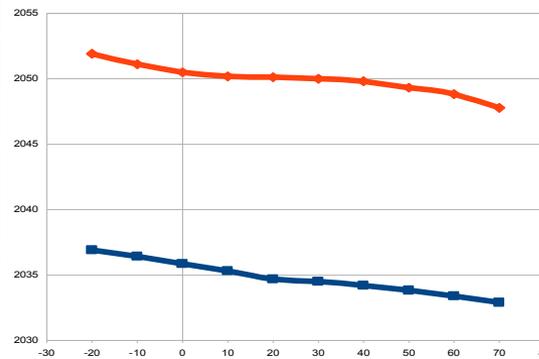
Réalisation de résonateurs pour filtres à éléments d'impédance à 2 GHz sur tranches de LiTaO<sub>3</sub> (YXI)/42° sur silicium – minimisation de la dérive thermique

Compensation par effets thermoélastiques différentiels

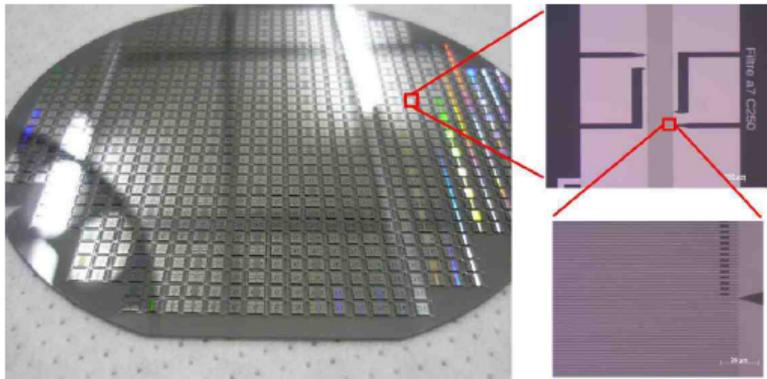
Solution développée dans le cadre des projets ANR POEM et FEDER Dionysos avec FEMTO-ST, CEA-LETI et TDK EPCOS



Évolution de la conductance en température



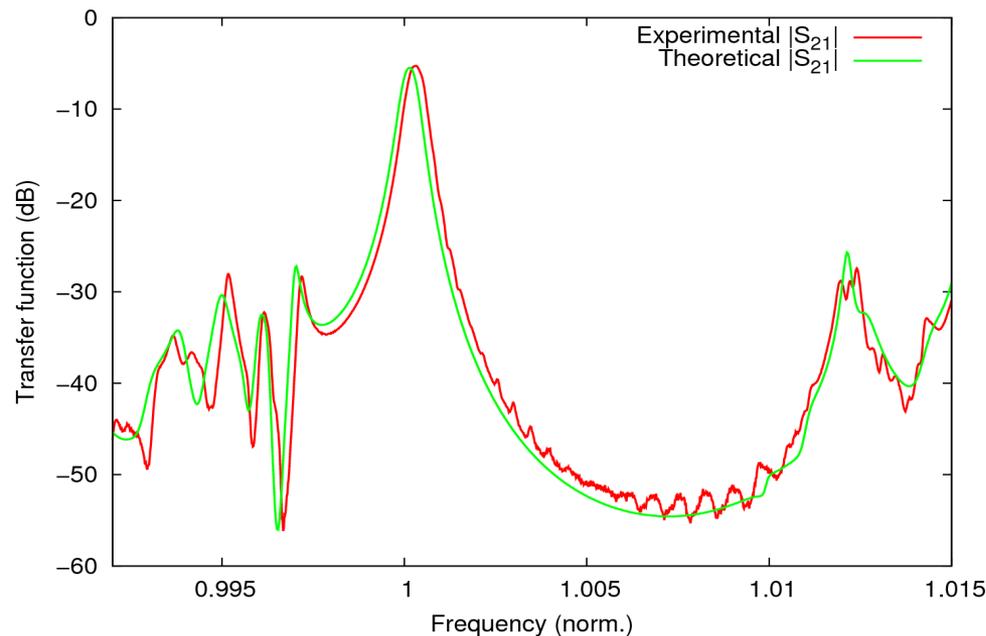
Variation du couplage et de la fréquence suivant la température d'un résonateur encapsulé (mesures EPCOS)



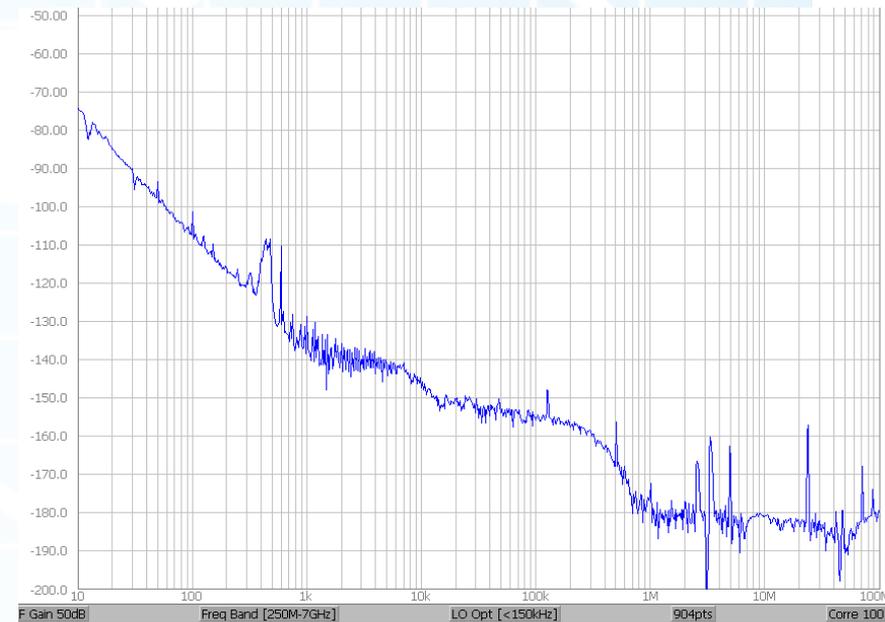
Réalisation de résonateurs sur tranche de quartz – pertes d'insertion de l'ordre de 6 dB pour une bande passante de 300 à 500 kHz

Effet du filtrage sur le bruit de phase d'un oscillateur multiplié → amélioration du bruit de phase à 300 kHz de la porteuse

Solution développée pour AR Electronique



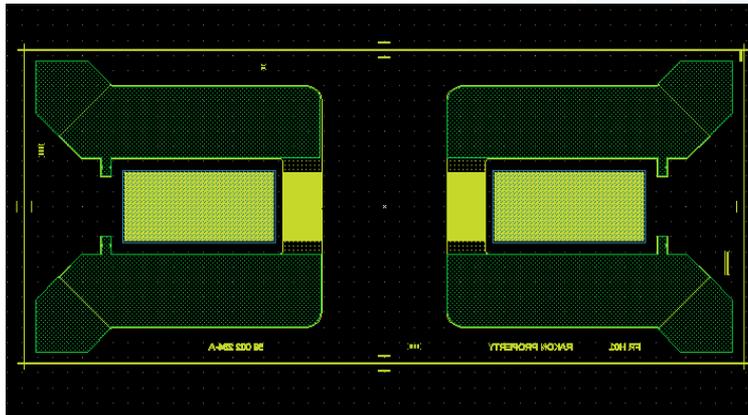
Accord théorie-expérience



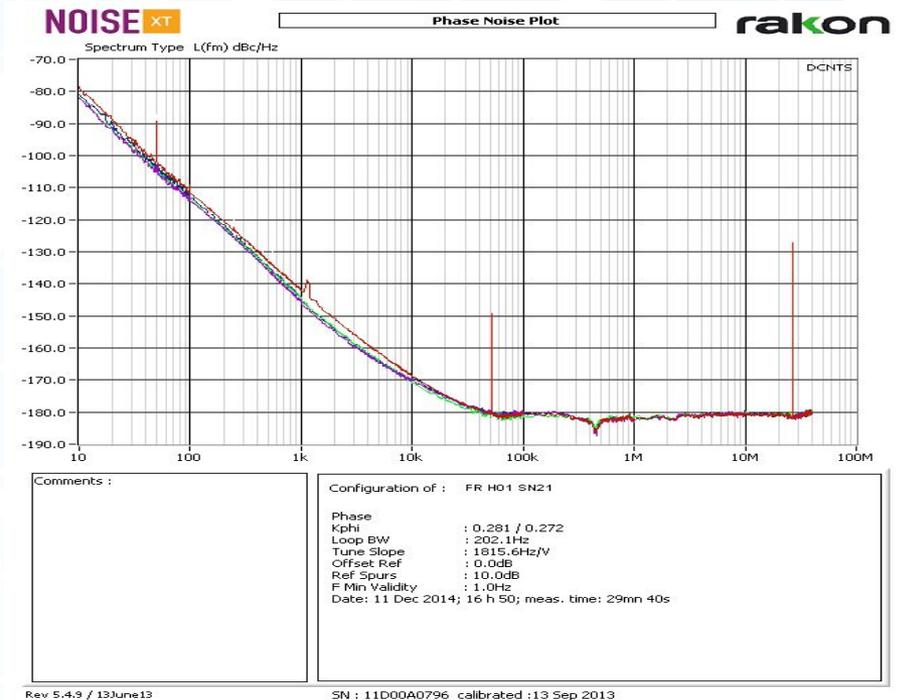
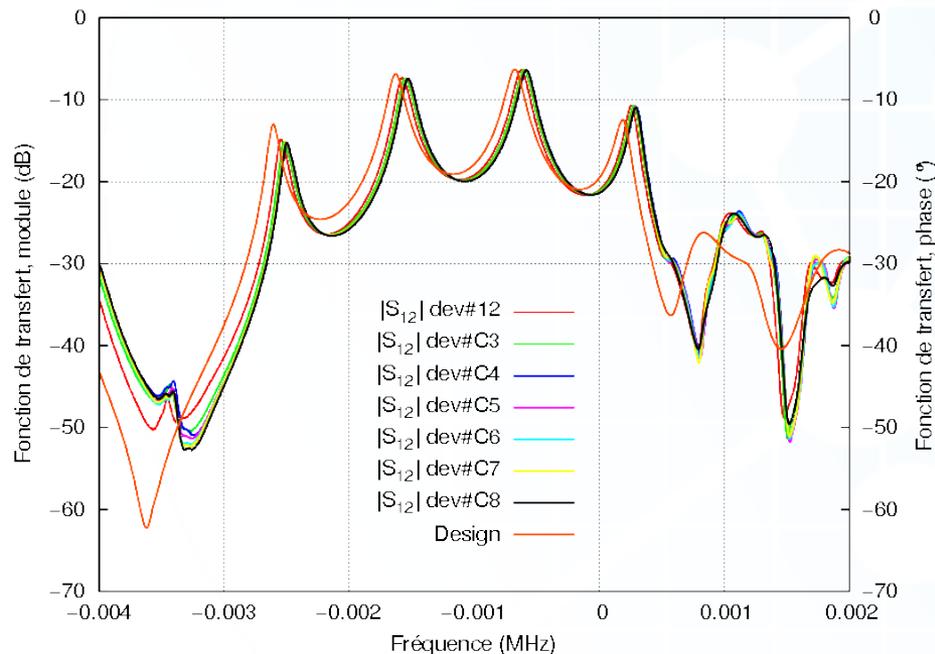
Amélioration des résonateurs RF de Rakon (300MHz – 1GHz) pour les VCSO

Sources plus compactes, améliorant les caractéristiques fonctionnelles des VCSO

Travaux effectués pour RAKON – France, collaboration avec FEMTO-ST



Nouveau design : mesures et validation

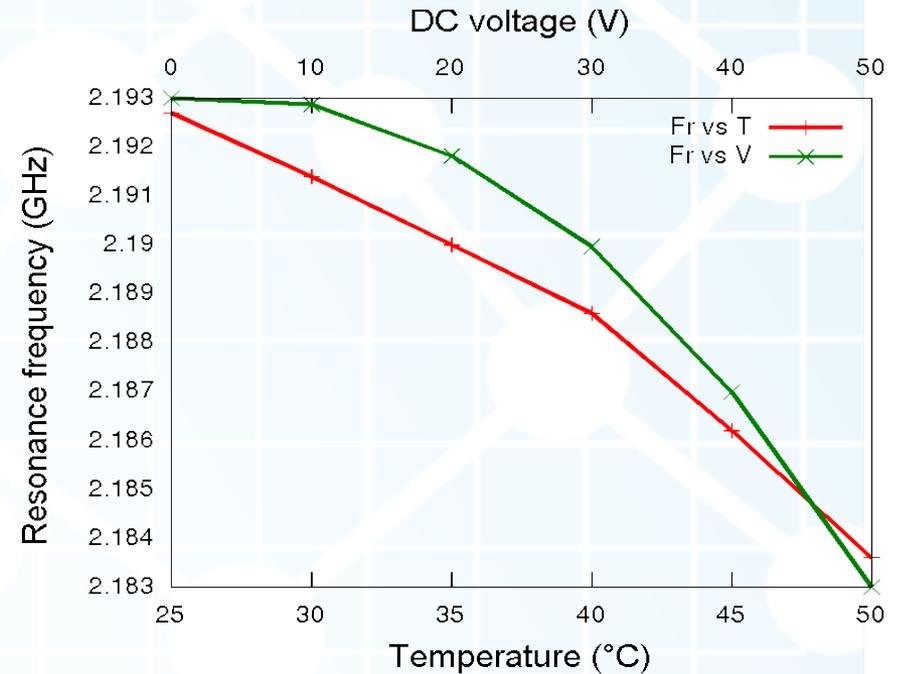
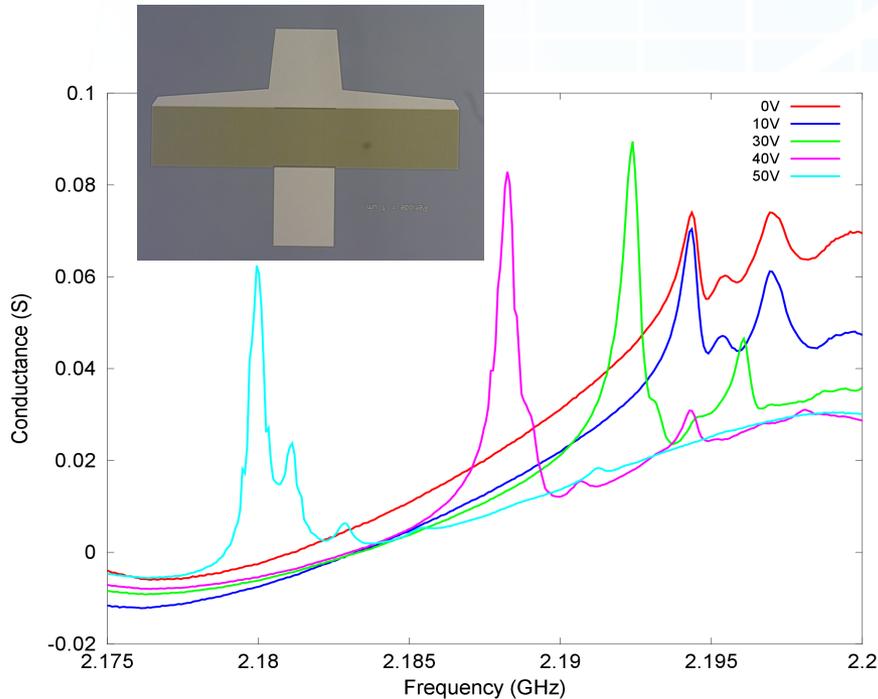
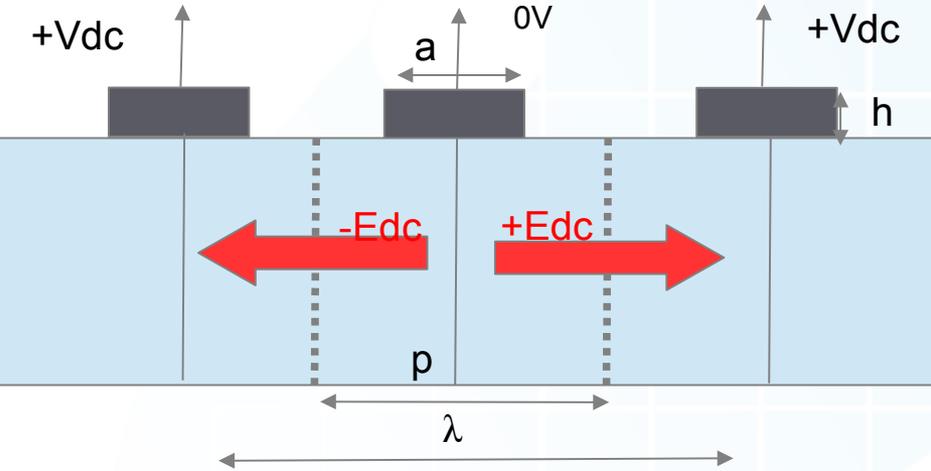


# SAW : accordabilité grâce à l'électrostriction

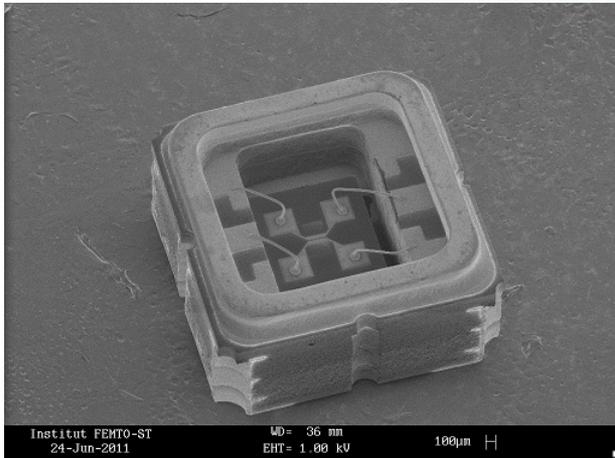
Résonateurs à ondes de surface sur titanate de strontium excités par effets électrostrictifs

Accordabilité de l'ordre de  $10^{-3}$ , en pratique  $10^{-4}$  en maintenant les caractéristiques du mode

Solution développée avec FEMTO-ST et le CEA-LETI, projets ANR MOCA et FEDER COMMODO



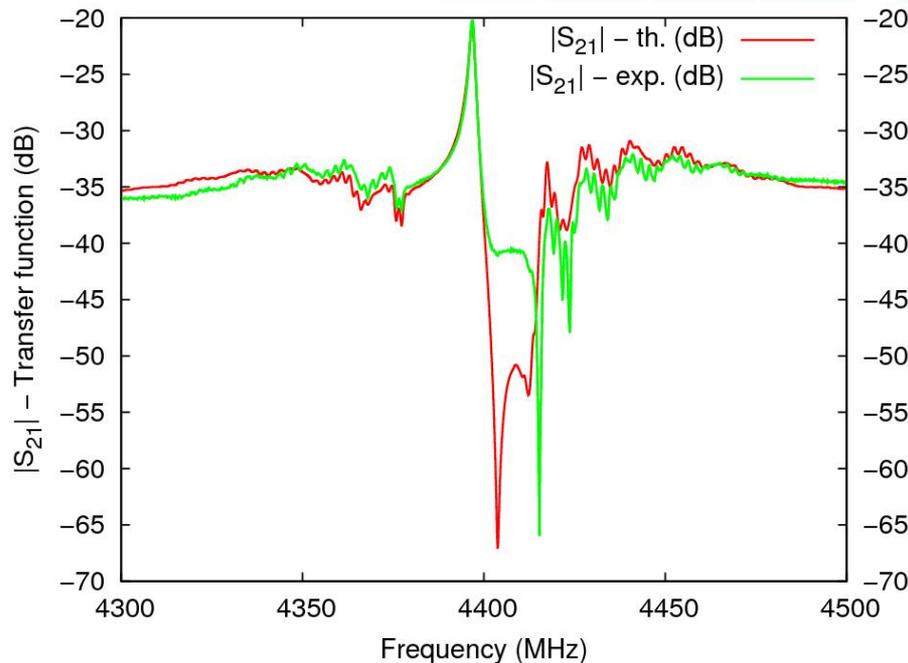
# SAW : montée en fréquence – résonateurs en bande C



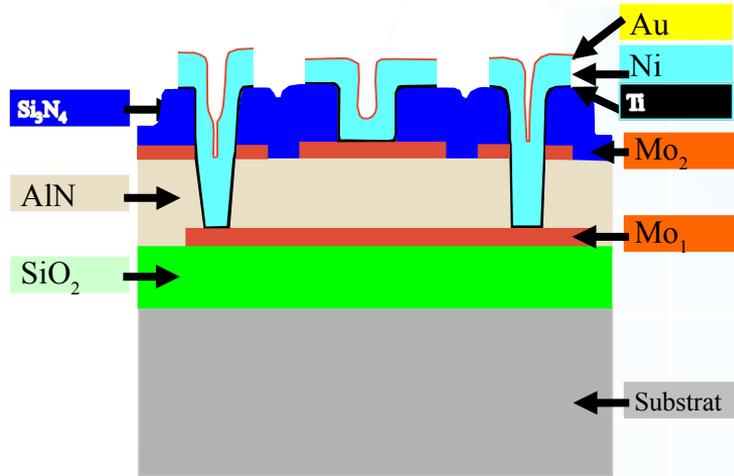
Réalisation de résonateurs à base d'AlN épitaxié sur saphir : parmi les meilleurs Q.F jamais obtenus en SAW

Vers une source maîtrisée en France de ces substrats – plaques 100 mm visées

Solution développée en collaboration avec Sil'Tronix, Rakon et FEMTO-ST (soutien DGA)



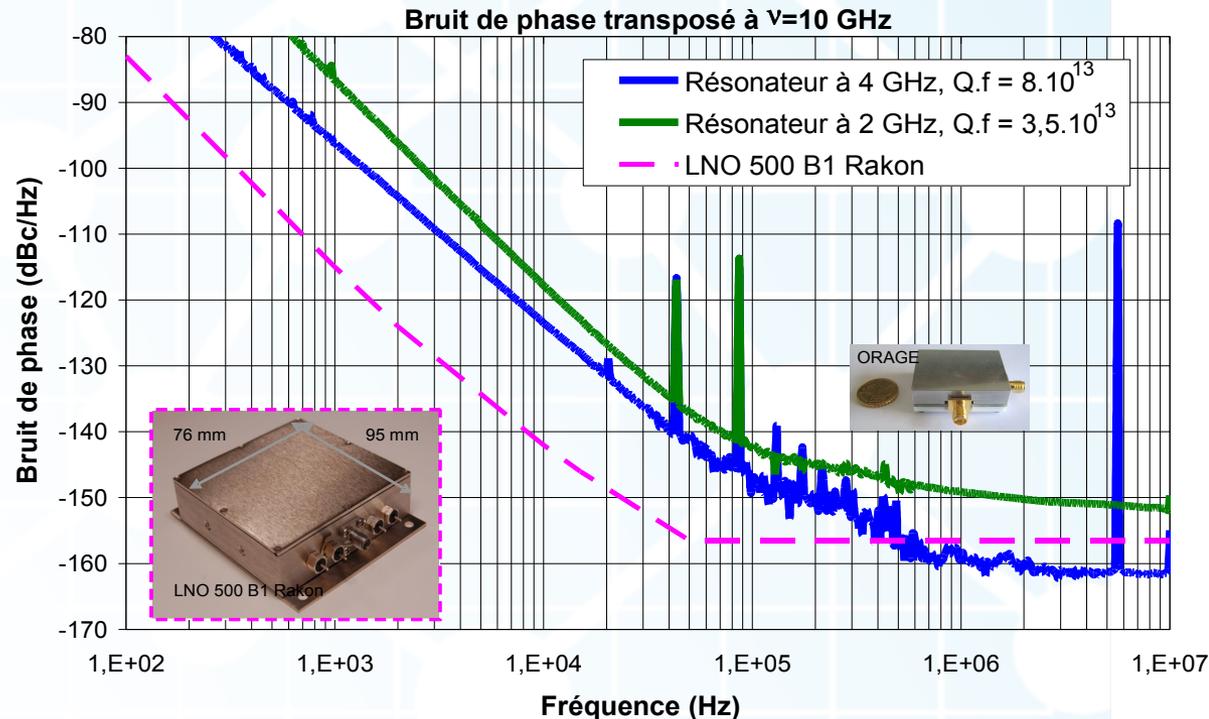
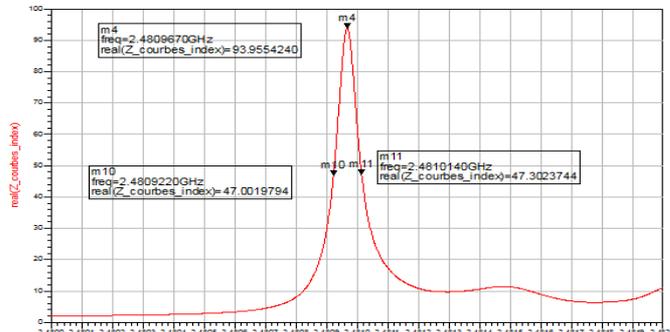
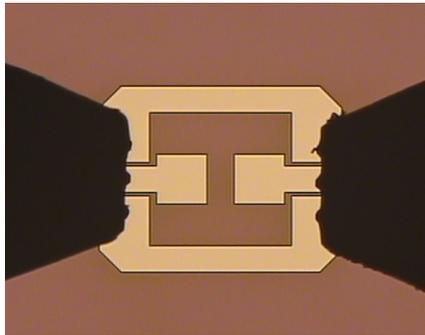
# HBAR : montée en fréquence – résonateurs en bandes S etC

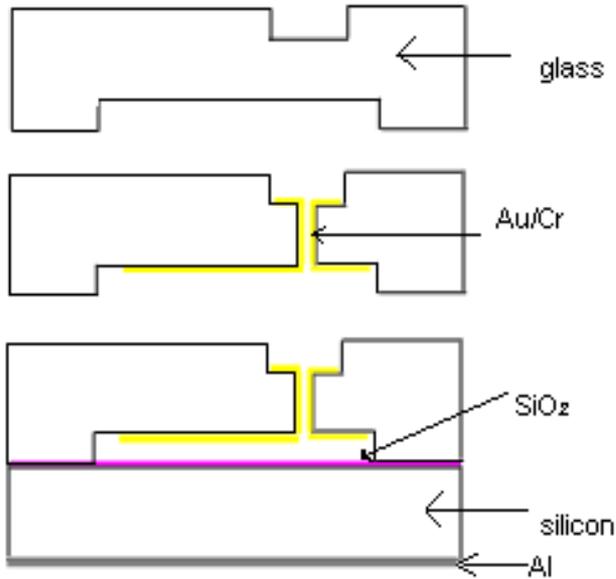


Résonateurs à base d'AlN déposé sur saphir :  
Q.F à l'état de l'art en acousto-électronique

Dispositifs pour synthèse en bande directe

Solution développée par SENSEOR avec  
FEMTO-ST et le CEA-LETI(soutien DGA)



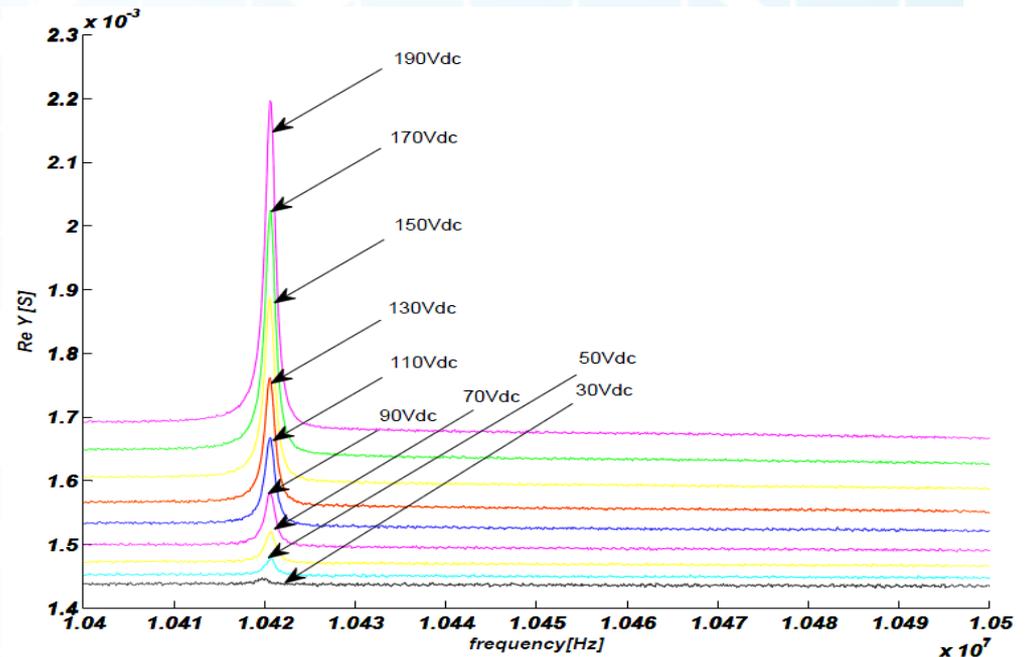
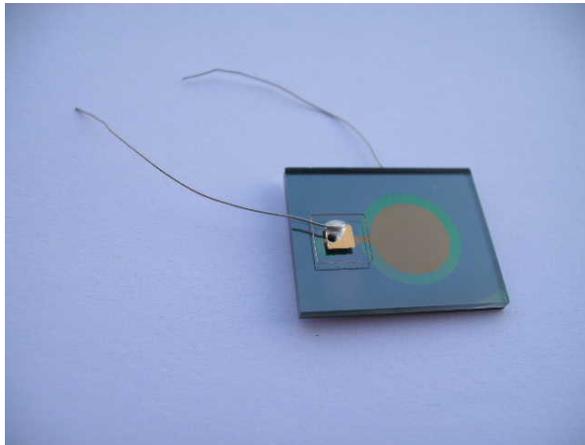


Exploiter des ondes élastiques excitées à l'aide de structures MEMS pour bénéficier des qualités de chaque approche

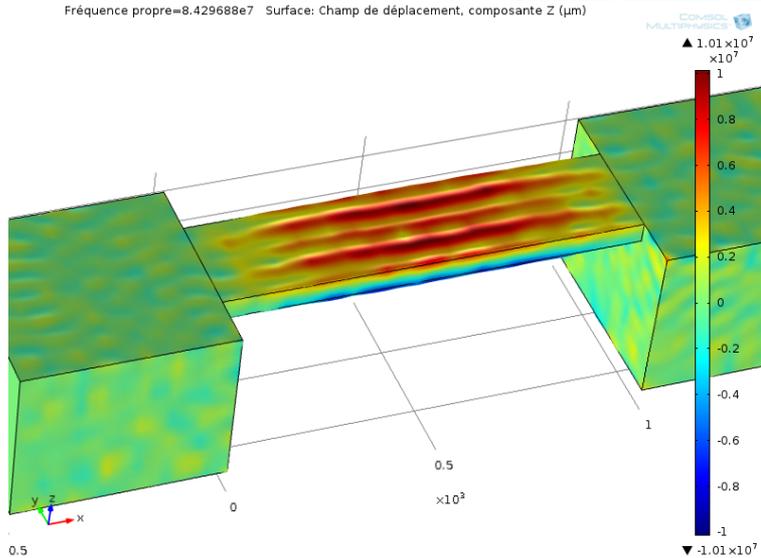
Résonateurs à ondes élastiques et excitation électrostatique sur silicium

Travaux menés par FEMTO-ST, DTF – B.Dulmet (frec|n|sys associé)

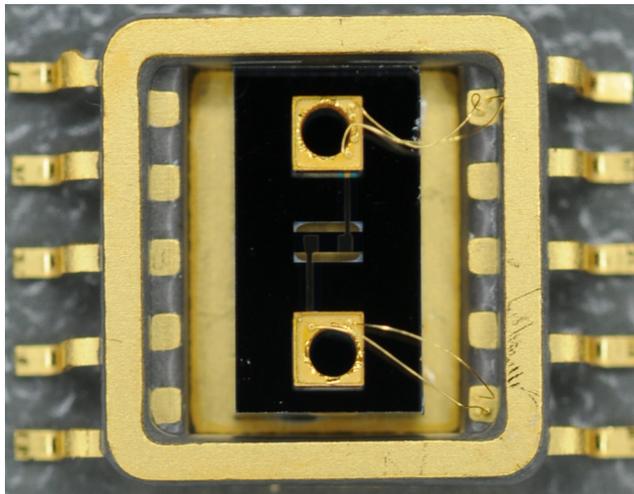
Principe de base et mise en œuvre



Fréquence propre=8.429688e7 Surface: Champ de déplacement, composante Z ( $\mu\text{m}$ )

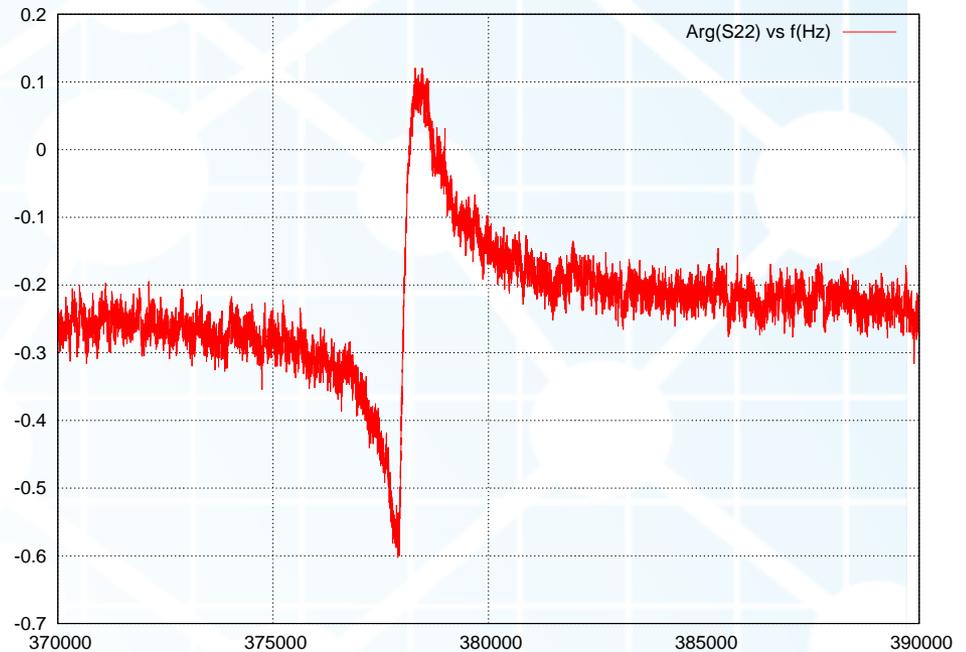


Principe de base et mise en œuvre



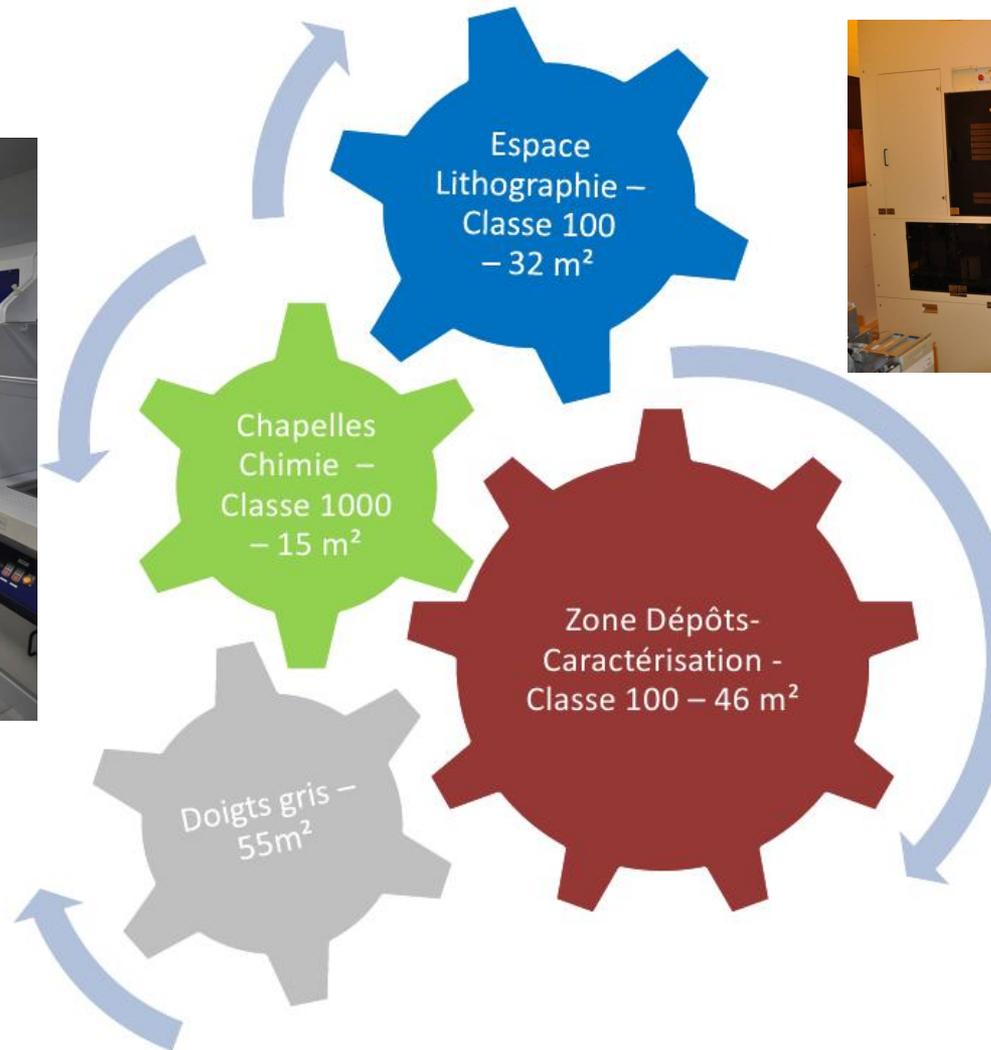
Même base technologique que pour la réalisation précédente mais pour exciter des ondes de Lamb

Travaux menés par FEMTO-ST, DTF – B.Dulmet (frecn|sys associé)





Capacité de production  
> 10 millions de pièces par an



*frec|n|sys est l'exploitant unique de cette ligne sous contrat avec l'Université de Franche-Comté, propriétaire des équipements + accès aux ressources MIMENTO*

- Quid des MEMS-RF pour les applications Temps-Fréquence
  - Beaucoup de développements à base de structures vibrantes sur silicium mais peu de réalisations industrielles complètes
    - Complexité et coût des procédés
    - Fiabilité des réalisations et dépendance paramétrique
    - Robustesse des solutions classiques
    - Solutions hybrides pertinentes – recours aux principes de SiP
    - Tensions d'activation
  - FBAR, HBAR, SAW – ondes élastiques guidées sur wafers composites constituent des solutions MEMS-RF à fort potentiel
    - Résonateurs SAW : état de l'art en termes de bruit de phase/compacité
    - Résonateurs HBAR : Q.F max pour les applications acousto-électriques →  $10^{14}$  et sans doute plus
    - Vieux principes revisités → vers de nouveaux concepts
    - Nouveaux matériaux : III-V épitaxiés GaN, AlN → vers des solutions à fort potentiel d'intégration (SoC)
  - Marché tiré par les applications stratégiques débouchant sur les applications grand public (télécoms, transport, énergie, etc.)

- A toute l'équipe frecn|sys
- L'équipe CoSyMA – Dept Temps-Fréquence, FEMTO-ST
- Les équipes des laboratoires LCRF et ASL, CEA-LETI
- L'équipe du Prof. Paul Muralt à l'EPFL, Lausanne
- Nos partenaires et clients : RAKON, AR Electronique, SENSEOR
- Nos soutiens : MESR, BPI France, Département du Doubs, Région Franche-Comté, FEDER, DIRECCTE, Grand Besançon, Incubateur d'Entreprises Innovantes Franche-Comté
- Au LabEx First-TF pour son invitation et son soutien