

micro et nanoélectronique
microsystèmes
intelligence ambiante
chaîne de l'image
biologie et santé



2007

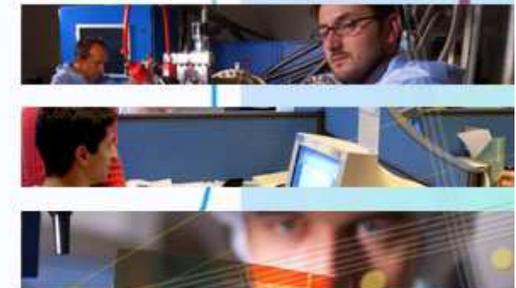
**Micro et nanotechnologies émergentes
pour applications radiofréquence; des
procédés de fabrication aux applications
dans les futurs produits**

C. BILLARD

cea

leti

MINATEC®
POLE INNOVATION





leti

MINATEC

2007



Plan de l'exposé

- Introduction
 - Définition et intérêt des MEMS RF
 - Les différents types d'actionneurs
 - Les technologies de fabrication

- Les composants MEMS RF
 - Les inductances à fort Q
 - Les commutateurs
 - Les capacités variables
 - Les résonateurs et filtres mécaniques
 - Les résonateurs et filtres acoustiques

- Intégration et packaging

- Systèmes et architectures à base de MEMS RF

- Introduction aux NEMS RF

- Conclusion



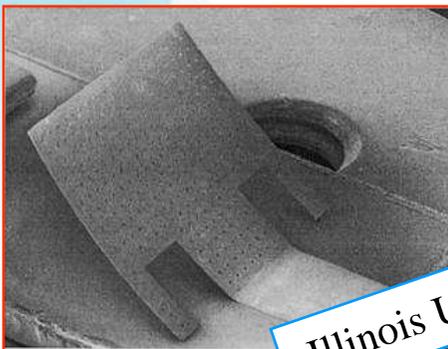
leti

MINATEC

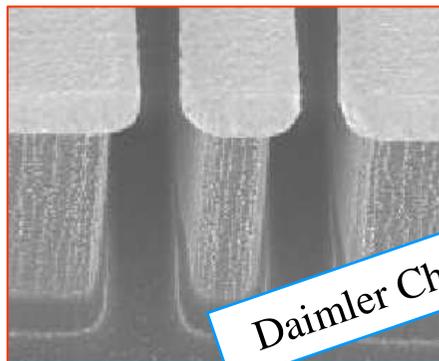
2007

Qu'est-ce qu'un MEMS RF ?

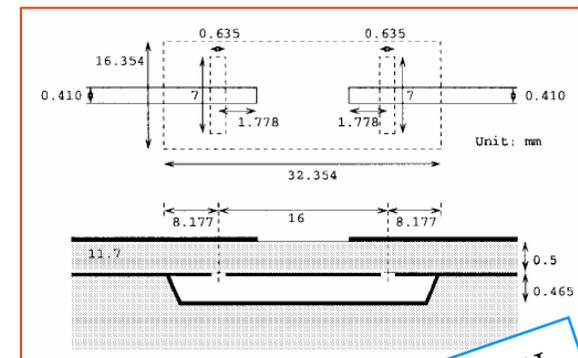
- MEMS = **M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystems
 - Intégration de systèmes mécaniques (actuateurs, capteurs) sur silicium avec des technologies de micro-fabrication.
 - A priori dispositif avec un mouvement mécanique.
 - Par abus de langage, on appelle aussi MEMS des composants non mobiles mais réalisés avec les technologies MEMS.
- MEMS **RF** = application des technologies MEMS au domaine de la radiofréquence, de quelques MHz à 200 GHz.
- Classement des MEMS RF suivant l'application
 - Les micro-commutateurs
 - Les passifs : inductances et capacités variables
 - Les résonateurs et les filtres
 - Les antennes
 - Les lignes de transmission



Illinois U.



Daimler Chrysler



Michigan U.



leti

MINATEC

2007

cea

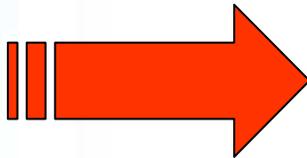
Intérêt des MEMS RF

■ Les avantages

- Miniaturisation des composants et des systèmes
- Co-intégration avec les ICs → baisse des coûts de fabrication
- Intégration sur différents substrats
- Consommation très faible
- Excellentes performances RF sur une large bande
- Linéarité
- Réalisation de nouvelles fonctions et architectures RF reconfigurables

■ Les inconvénients

- Process encore compliquée (ex : > 15 masques pour switch LETI)
- Obligation d'un packaging hermétique dans certains cas → impact sur le coût
- Problème de fiabilité notamment des contacts
- Tenue à la puissance
- Temps de commutation
- Pas encore disponibles sur le marché et peu de fabricants potentiels



Les MEMS RF ont beaucoup de potentiels mais il faut maintenant les porter à un niveau de maturité industrielle !



leti

MINATEC

2007

Les types d'actionneurs

■ Actionnement électrostatique

- Les +**
 - Faible consommation
 - Intégration simple
 - Nombreuses variantes
- Les -**
 - Densité d'énergie faible
 - Risque de collage des structures
 - Tension d'actionnement élevée

■ Actionnement thermique

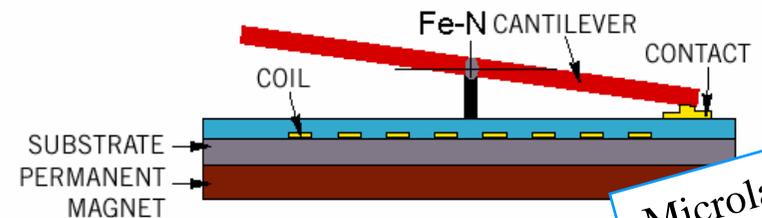
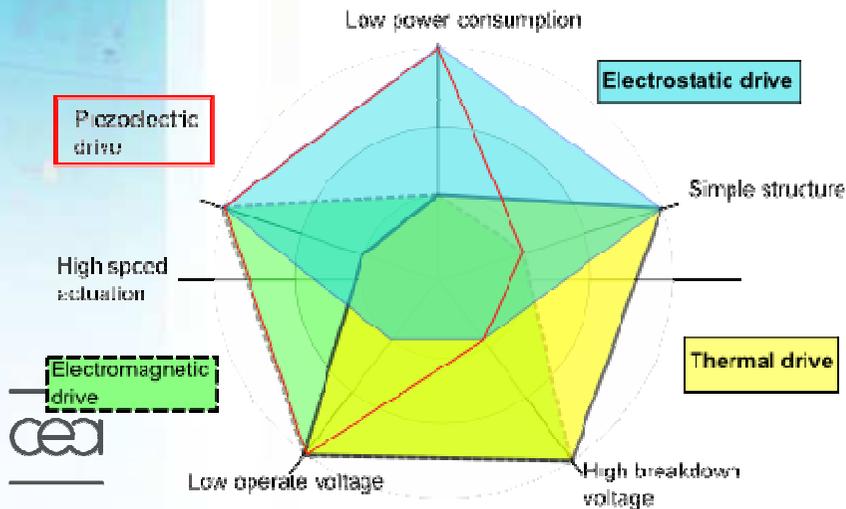
- Les +**
 - Densité d'énergie importante
 - Grands déplacements
 - Intégration « assez » simple
- Les -**
 - Puissance consommée élevée
 - Assez Lent

■ Actionnement magnétique

- Les +**
 - Bistable
 - Densité d'énergie importante
 - Grands déplacements
- Les -**
 - Fort courant de commande
 - Intégration compliquée

■ Actionnement piézoélectrique

- Les +**
 - Faible consommation
 - Faible tension d'actionnement
 - Intégration simple
- Les -**
 - Sensibilité à la T°
 - Faible amplitude de déplacement



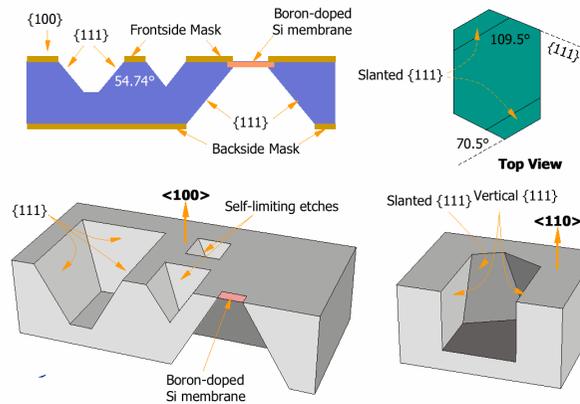
Microlab



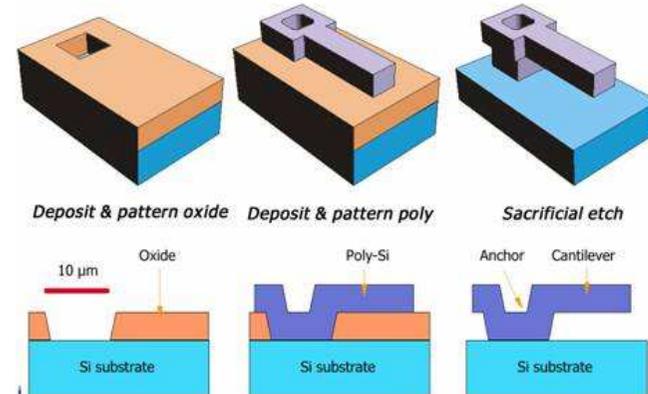
Les technologies de fabrication

- Quatre grands types de technologies de fabrication des MEMS
 - Bulk micromachining
 - Surface micromachining

Anisotropic Wet Etching of Silicon

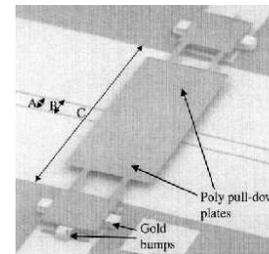
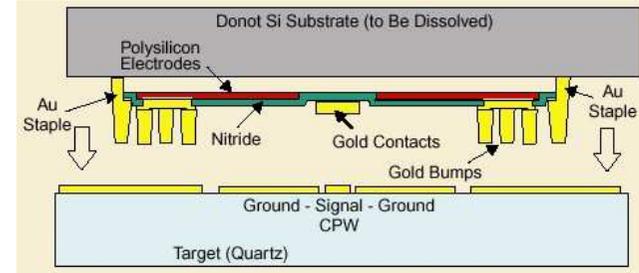
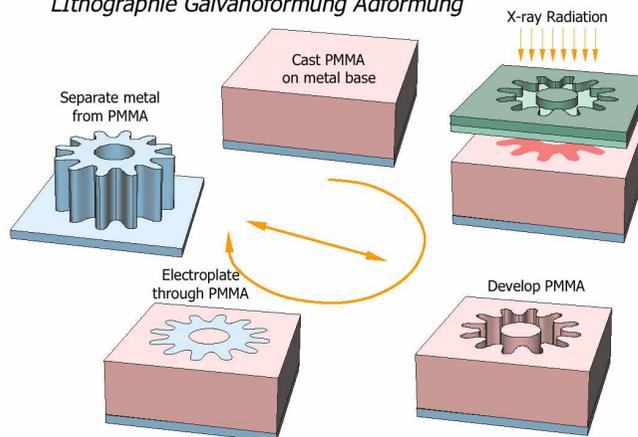


Surface Micromachining



LIGA Process

Lithographie Galvanoformung Adformung



Berkeley 2000

leti

MINATEC

2007





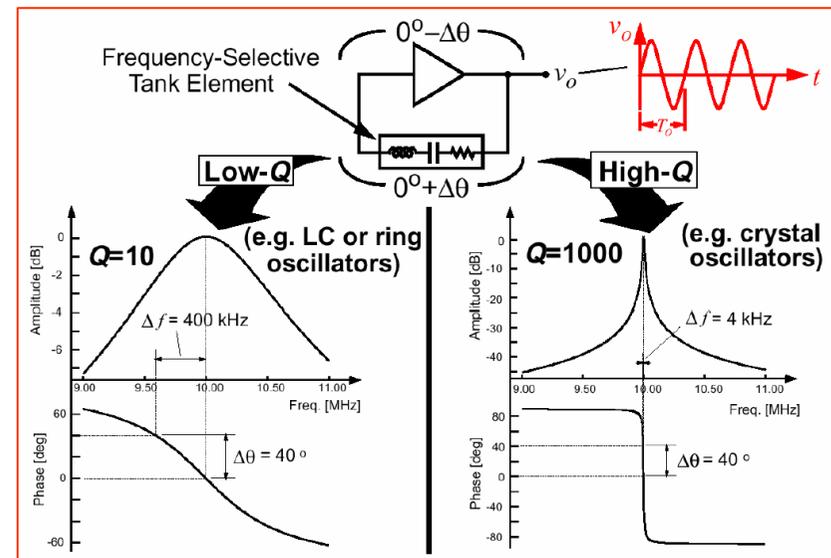
leti

MINATEC

Les inductances à fort Q (1)

- Nécessaires à beaucoup d'applications RF : synthèse de fréquence, adaptation d'impédance et filtres accordables.
- Le facteur Q de l'inductance a un impact direct sur les performances des circuits.
- Les inductances intégrés sur silicium restent limitées en performances : $Q \sim 25$ @ 2 GHz pour du BiCMOS7RF avec une métallisation de $5\mu\text{m}$ cuivre et un plan patterné.
- Il y a 4 techniques MEMS d'optimisation des inductances
 - Les métallisations de fortes épaisseurs
 - Les solénoïdes 3 D
 - La gravure du substrat
 - L'élévation par rapport au substrat

Circuit	Paramètre	Effet du facteur Q
Oscillateur	Bruit de phase	$1/Q^2$
Oscillateur	Consommation	$1/Q$
Amplificateur	Gain	Q
Amplificateur	Consommation	$1/Q$
Réseau d'adaptation	Pertes	$1/Q$
Filtre	Pertes	$1/Q$
Système	Noise figure	$1/Q$





Les inductances à fort Q (2)

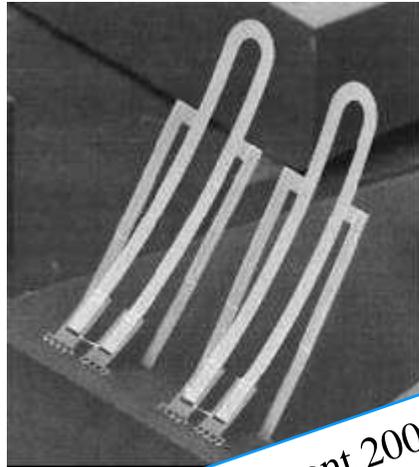
- Exemples de réalisations



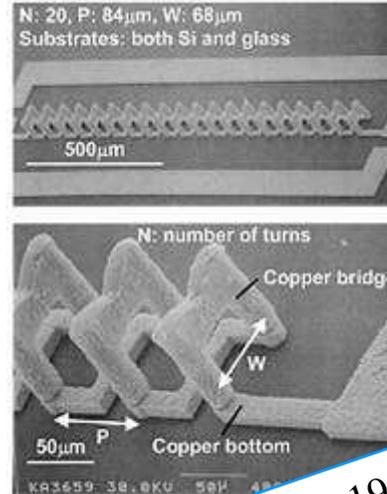
leti

MINATEC

2007



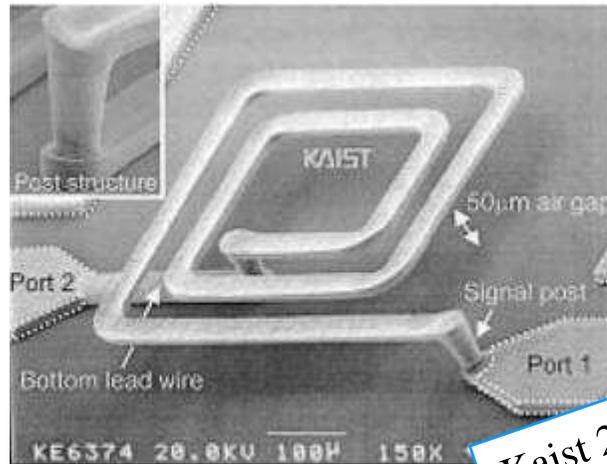
Lucent 2001



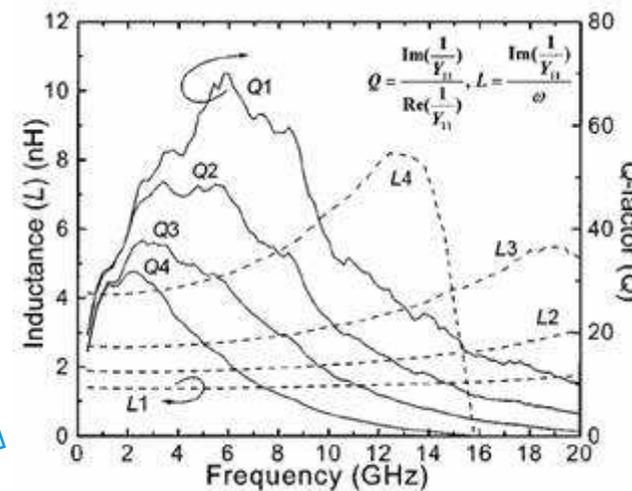
Kaist 1999



Carnegie Mellon U. 2002



Kaist 2002





leti

MINATEC

2007



Les micro-commutateurs (1)

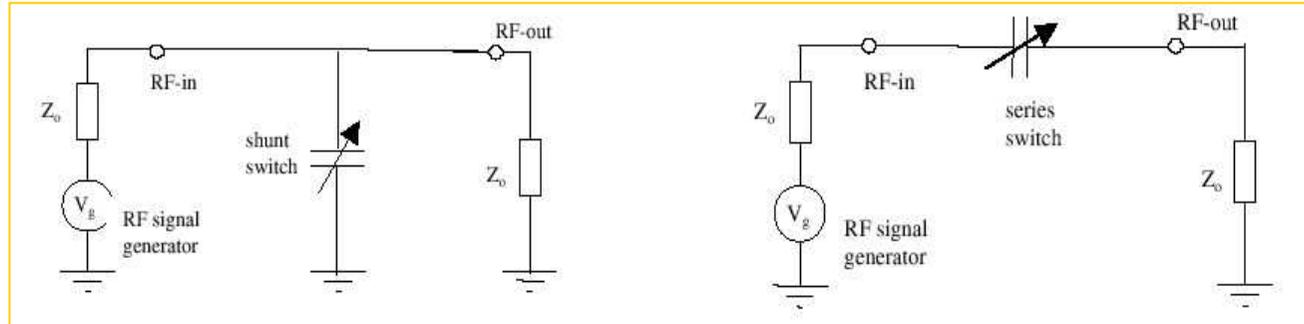
- Le composant MEMS RF le plus étudié depuis 1991.
- Performances RF nettement supérieures à ses concurrents actifs (PIN et FET).
- Miniaturisation importante par rapport à son concurrent mécanique.
- Composant qu'il faudrait encore optimiser : tension de commande < 10 V, temps de commutation et tenue à la puissance RF.

Paramètres	RF MEMS	PIN	FET
Tension de commande (V)	20-80	± 3-5	3-5
Courant de commande (mA)	0	3-20	0
Consommation (mW)	0.05-0.1	5-100	0.05-0.1
Temps de commutation	1-300 µs	1-100 ns	1-100 ns
Cup (configuration série) (fF)	1-6	40-80	70-140
Rs (configuration série) (Ω)	0.5-2	2-4	4-6
Ratio capacité Cdown/Cup	40-500	10	
Fréquence de coupure (THz)	20-80	1-4	0.5-2
Isolation (1-10 GHz)	Très haute	Haute	Moyenne
Isolation (10-40 GHz)	Très haute	Moyenne	Faible
Isolation (60-100 GHz)	Haute	Moyenne	-
Pertes (1-100 GHz) (dB)	0.05-0.2	0.3-1.2	0.4-2.5
Puissance admissible (W)	<1	<10	<10
Linéarité (IP3) (dBm)	+66-80	+27-45	+27-45

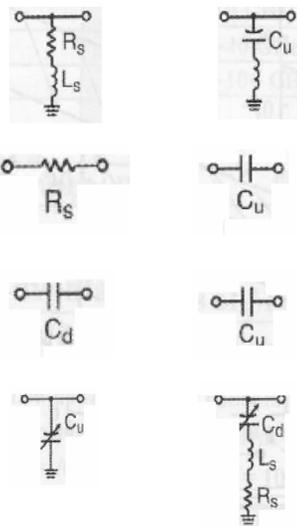


Les micro-commutateurs (2)

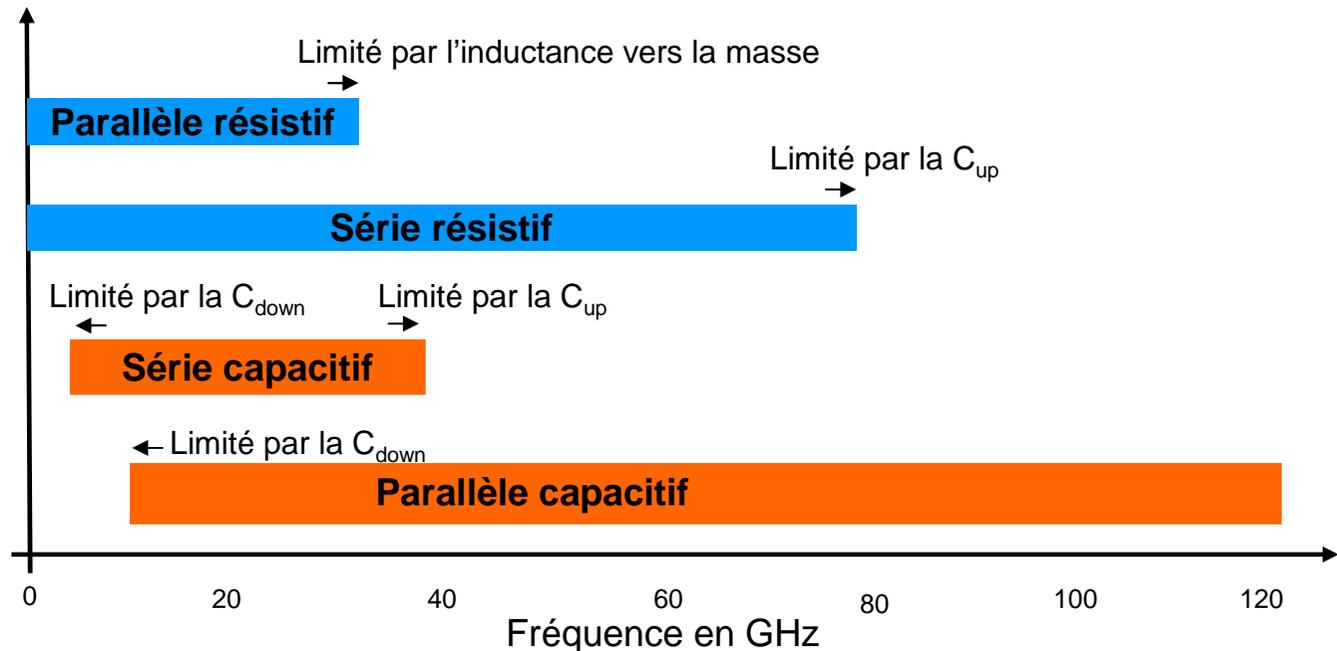
- Le choix du contact et de la configuration du circuit RF sont fixés au 1er ordre par la fréquence de travail
- Et au second ordre par la tenue à la puissance RF et la fiabilité



État ON État OFF



Schémas équivalents





Les micro-commutateurs (3)

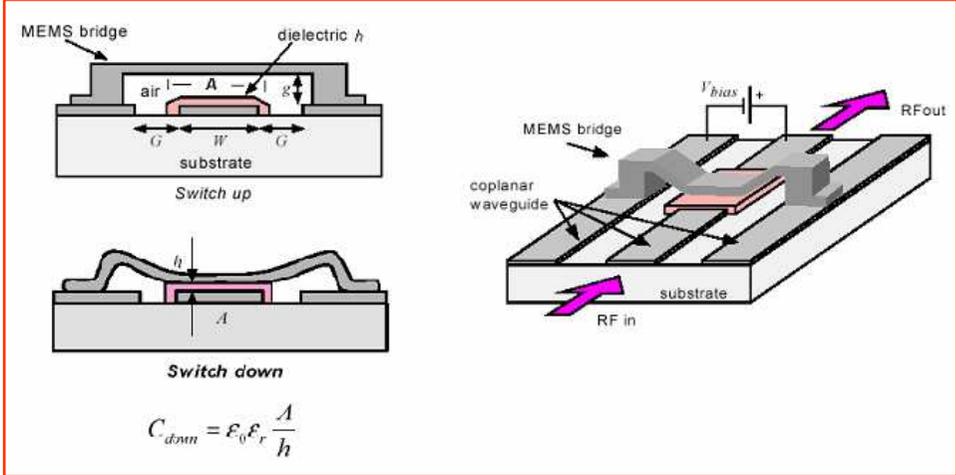
■ Le commutateur capacitif parallèle

Les +

- Très bon en hautes fréquences
- Très faibles pertes (pas de R_{contact})
- Meilleure tenue à la puissance
(+ grande surface de contact)

Les -

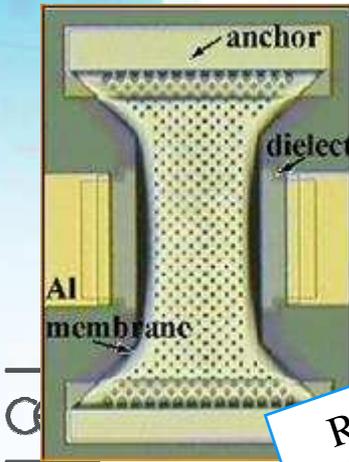
- Mauvais en basses fréquences
- Membrane métallique : Cup ↑ et contrôle du stress
- Pb inhérent au diélectrique (charges, radiations, ...)



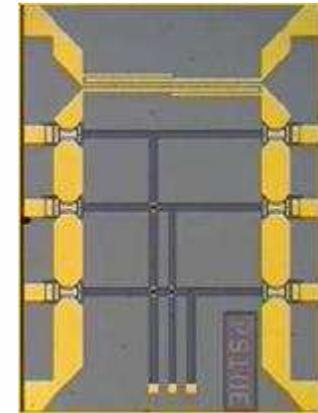
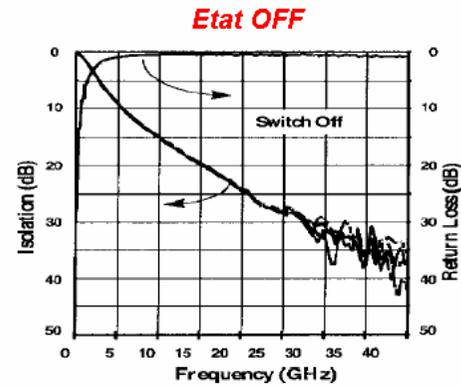
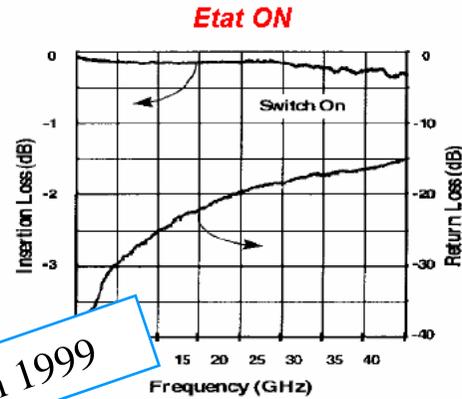
leti

MINATEC

2007



Raytheon 1999





Les micro-commutateurs (4)

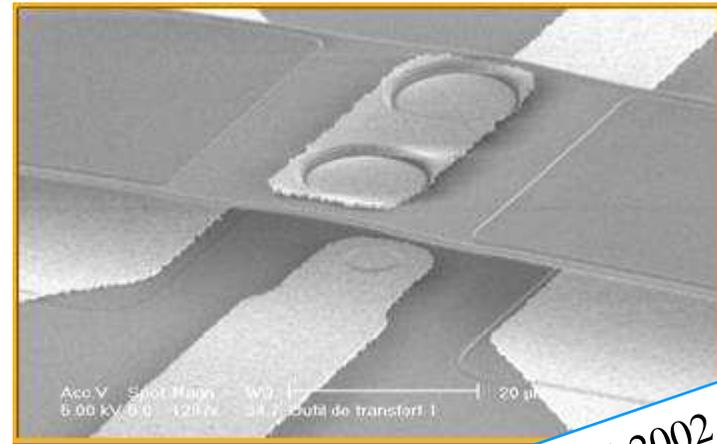
Le commutateur ohmique série

Les +

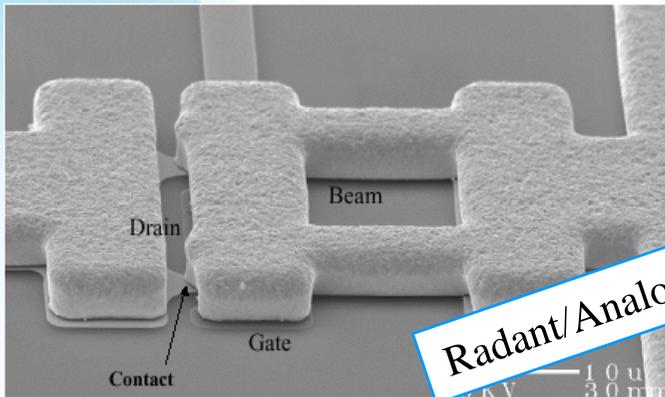
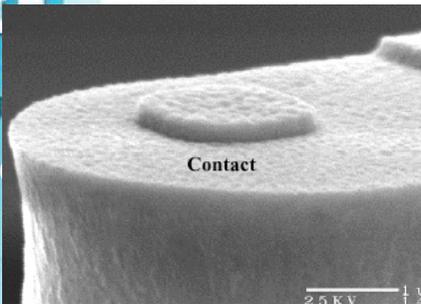
- Très bon en basses fréquences
- Pas de diélectrique

Les -

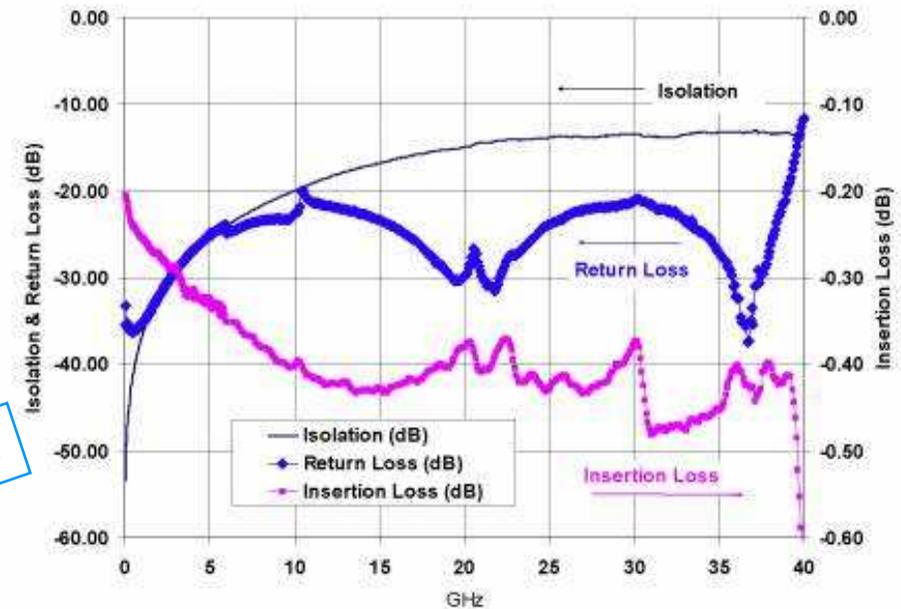
- Pb inhérents au contact métal/métal (état de surface, contamination, forces d'adhésion, ...)
- Tenue à la puissance : pb thermique avec R_{contact}



Leti 2002



Radant/Analog device 2002





leti

MINATEC

2007



Les micro-commutateurs (5)

■ Travaux accomplis et en cours

- Grande gamme de switches : électrostatique, thermique, magnétique
- Performances RF très bonnes
- Modélisations RF et mécanique assez bonnes
- Compatibilité avec les process CMOS et AsGa
- A court terme pas de problèmes pour les faibles puissances (<500 mW) : capacitif et ohmique
- Moyenne puissance : ohmique + activation thermique/magnétique semble un bon candidat
- Tenue à la T° surtout pour les structures « souples »
- Effet des rayonnements surtout sur les diélectriques

■ Ce qu'il reste à faire

- Bistabilité : magnétique ou mécanique
- Tenue aux fortes puissances > 5 W
- Temps de commutation < 1 μ s avec 30 à 50 volts
- Améliorer les rendements : utilisation dans les réseaux et les déphaseurs
- Driver intégré en CMOS
- Études des diélectriques et des contacts métal-métal : nombre de cycles
- Études avec T°, radiation, puissance, hot et cold switching



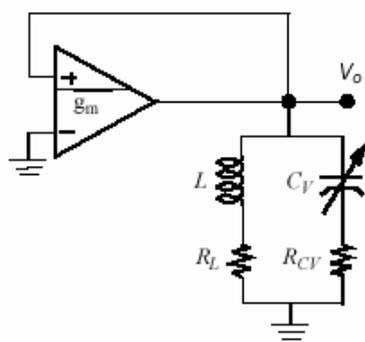
leti

MINATEC

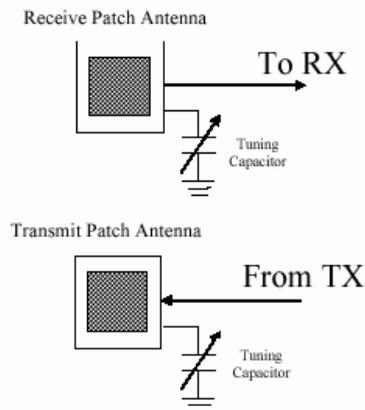
2007

Les capacités variables (1)

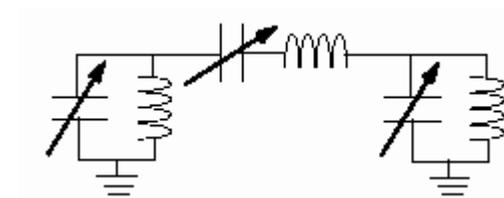
- Faible développement des capacités MEMS p/r aux switches (4 fois moins de publications, 5 fois moins de brevets) pour plusieurs raisons :
 - Les varactors Si, SiGe et GaAs ont de bonnes performances entre 0.1 et 5 GHz ($Q \sim 30-50$, $C_{ratio} = 1:4-6$).
 - Les performances des VCOs sont limitées par les inductances.
 - Sensibilité des capacités MEMS RF aux bruits en basse fréquence (Brownien, acoustique, vibrations).
 - Coût du packaging pour les capacités MEMS RF.
- Les capacités MEMS ont tout de même des propriétés intéressantes :
 - Facteur de qualité important : $Q > 100$ à 30 GHz.
 - Supportent des puissances importantes.
 - Excellente linéarité.
 - Fabrication sur divers substrats (Silicium HR, verre, céramique)
- Applications : Filtres, déphaseurs, adaptation d'impédance, VCO, antennes



VCO



Antenne



Filtre variable



Les capacités variables (2)

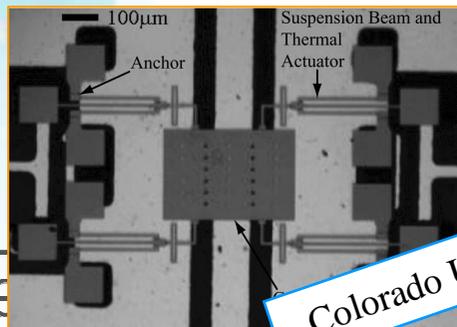
■ 3 types de capacités variables

$$C = \frac{\epsilon \times A}{g}$$

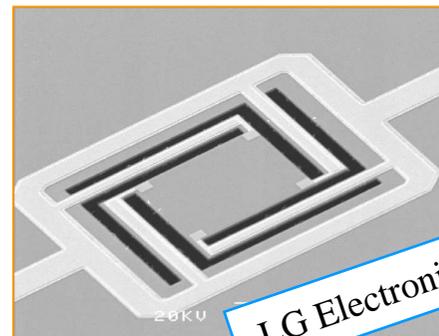
- Variation de la surface A : capacités interdigitées, ...
- Variation du diélectrique : ferroélectrique, diélectrique mobile
- Variation de l'entrefer g : capacités à plaques parallèles, zipping

■ Les paramètres déterminants :

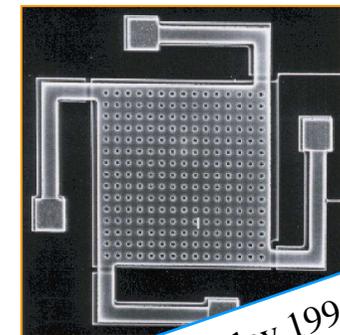
- La valeur de capacité : de 21 pF (500 MHz) à 0.026 pF (30 GHz) $\leftrightarrow -j200 < X < -j15 \Omega$
- Le tuning range : $C_{\text{ratio}} = C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$
- La fréquence de résonance : $F_s = 1 / (2 \times \pi \times \sqrt{LC})$
- Les pertes : pertes métalliques, pertes dans le substrat, ...
- Le facteur de qualité : $Q = \omega \times (\text{average energy stored} / \text{energy loss})$, $Q = X / R_s$
- La commande : électrostatique, thermique, piézoélectrique, etc ...



Colorado U. 1998



LG Electronics 2001



Berkeley 1996



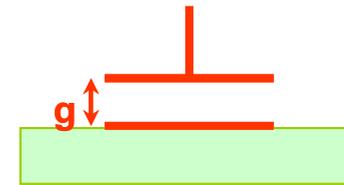
leti

MINATEC

Les capacités variables (3)

■ Les capacités à variation d'entrefer :

- 2 plaques parallèles, dont 1 mobile
- Pertes faibles: métal + air = fort Q

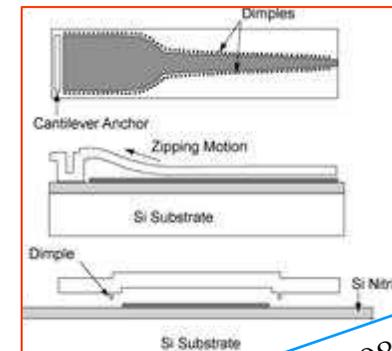


■ 3 types d'actionnement dans la littérature :

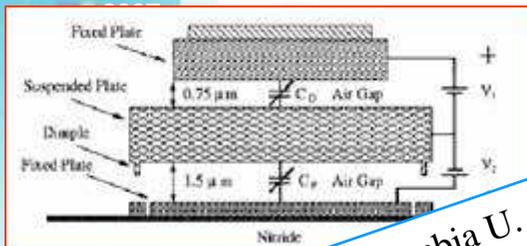
- Électrostatique : consommation nulle, C_{ratio} limité à 1.5 (phénomène de pull-in), extensible à 2-3 (découplage de la commande, trois plaques parallèles).
- Thermique : faible tension d'activation mais consommation en courant, pas de charges statiques et C(V) linéaire.
- Piézoélectrique : C_{ratio} élevé et faible tension d'activation.

■ Cas particulier du zipping :

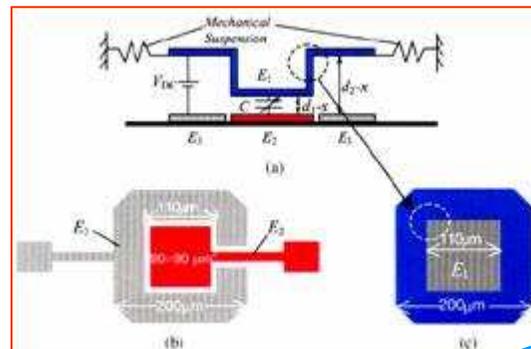
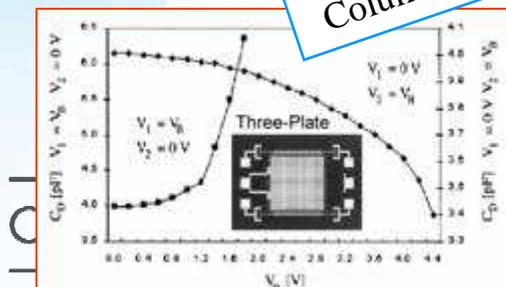
- Electrostatique mais pas de pull-in : C_{ratio} illimité.
- Grandes forces car activation de proche en proche.
- Possibilités de modifier la courbe C(V).



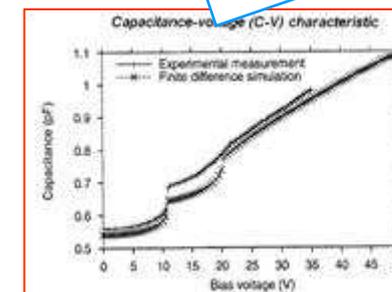
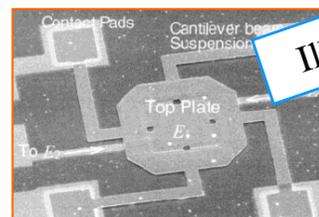
MIT 1998



Columbia U. 2000



Illinois U. 2001





leti

MINATEC

2007

Rockwell 1997-2002



Les capacités variables (4)

■ Les capacités à variations de surface :

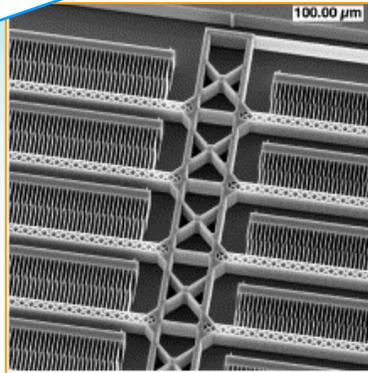
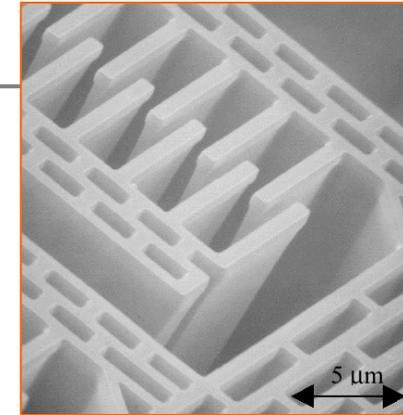
- Variation de la surface en vis-à-vis.
- Surface latérale : structures interdigitées.
- Actionnement électrostatique (... pour l'instant).

■ Avantages :

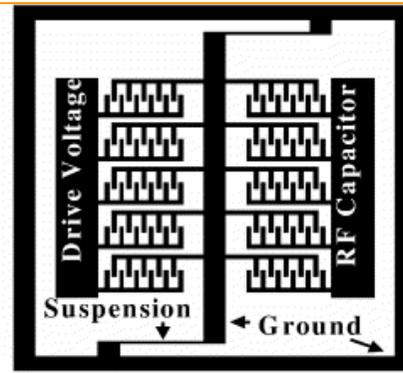
- Pas de limitation théorique du tuning range.
- Grande valeur de capacité : plusieurs centaines de doigts en //.
- Design très souple : croissance ou décroissance de $C(V)$.
- Process simplifié à quelques niveaux de masque.
- La tenue à la puissance RF ne varie pas avec C car le gap reste constant.
- Possibilité de faibles tensions d'actionnement.

■ Inconvénients :

- Dispositifs assez gros.
- Plutôt basses fréquences.
- Sensibilité aux accélérations.

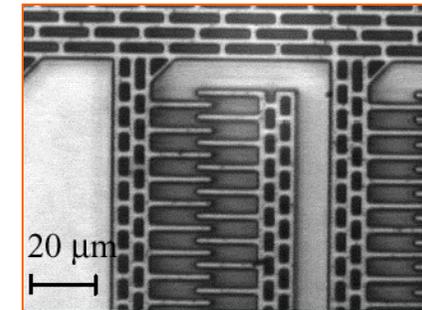


(a)

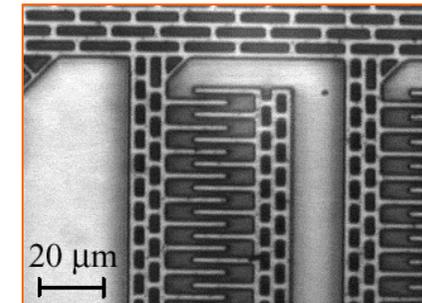


(b)

0 volts



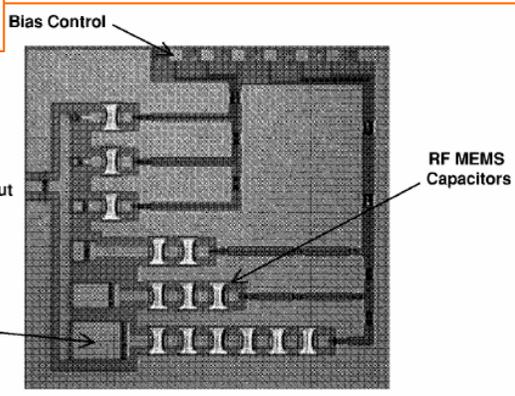
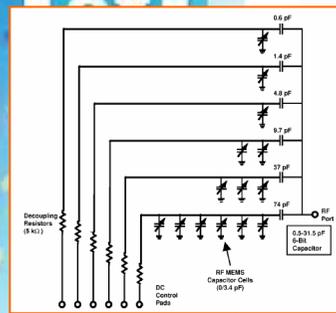
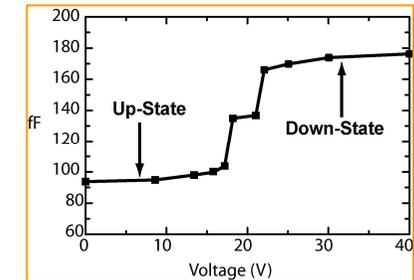
15 volts



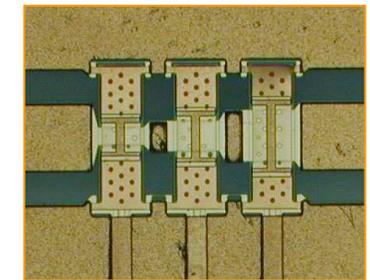
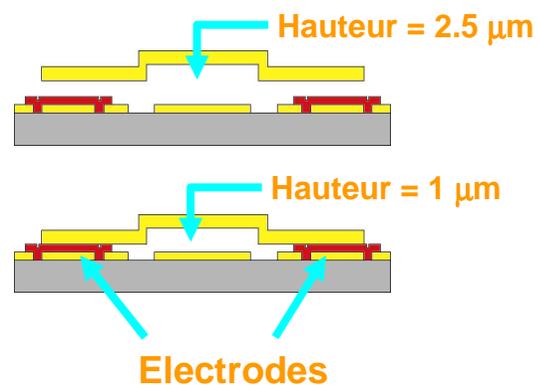


Les capacités variables (5)

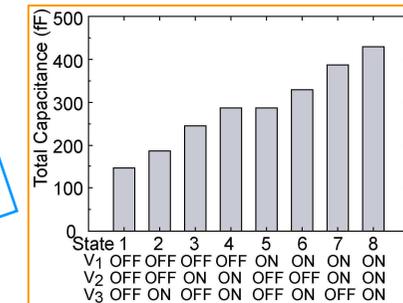
- Les capacités commutées
 - Commutation par des switches de capacités MIM.
 - Switches utilisés comme capacités variables : capacités discrètes.
- Avantages :
 - Précision, répétitivité vis-à-vis du process.
 - C_{ratio} illimité.
 - Moins sensibles aux bruits.
- Inconvénients :
 - Forte inductance série si trop gros design.
 - Pertes séries dans les switches (surtout si résistifs).
 - Fiabilité des switches.



Raytheon 1999



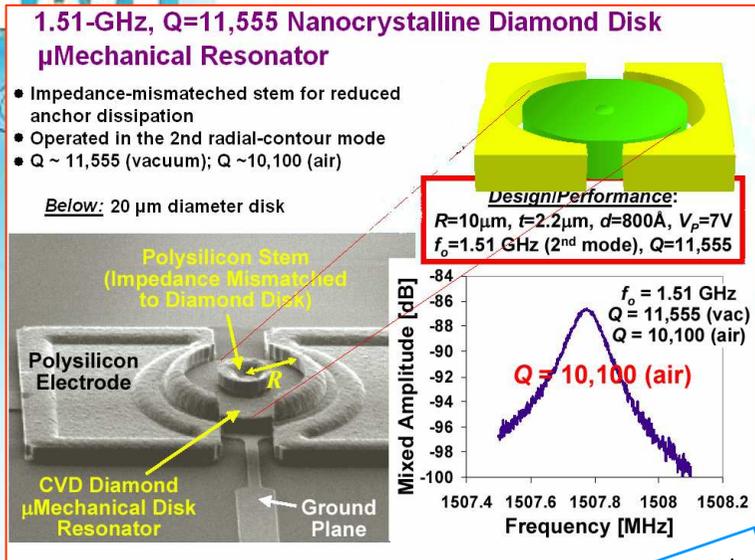
Michigan U. 2003



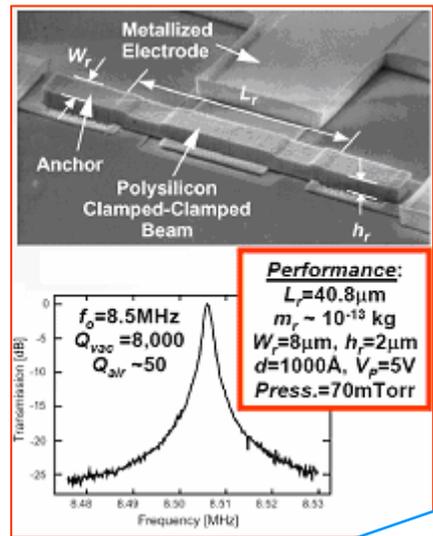


Les résonateurs et filtres micromécaniques

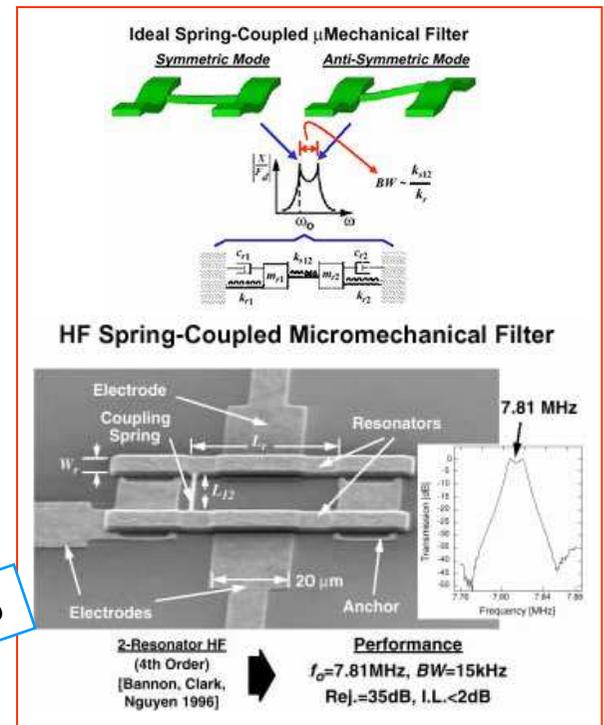
- L'objectif principal est de remplacer les quartz comme référence de fréquence.
- Les premières réalisations étaient basées sur des poutres vibrantes en polysilicium.
- Actuellement les recherches s'orientent sur des modes de volume ou de contours avec des résonateurs en forme de disques ou de carrés.
 - Peu d'amortissement par l'air → le vide n'est plus nécessaire.
 - Raideur plus importante → résonance à plus haute fréquence.
 - Volume plus grand → facteurs Q plus hauts et moins de sensibilité à la T°.
- Réalisation de filtres par couplage mécanique de plusieurs résonateurs.



Michigan U. 2004



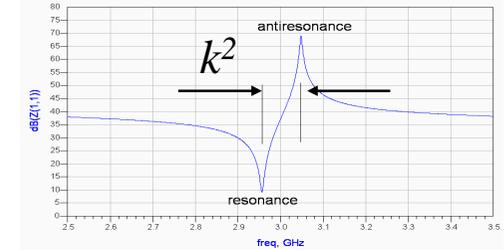
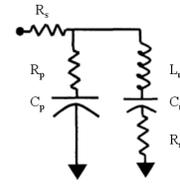
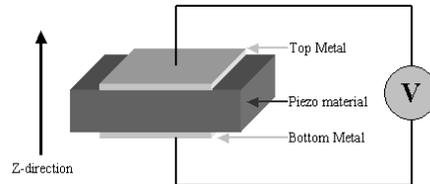
Michigan U. 1996



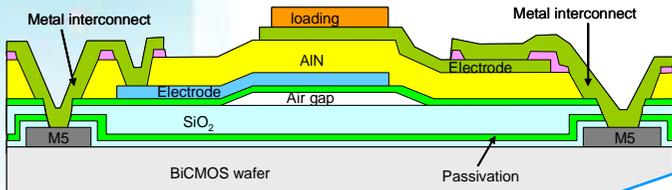


Les résonateurs et filtres acoustiques

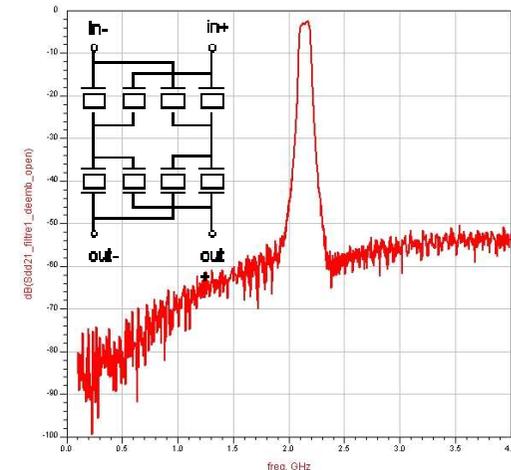
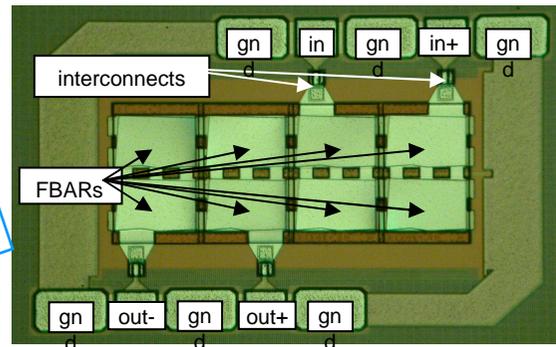
- Utilisation d'une onde acoustique de volume (Bulk Acoustic Waves) dans un matériau piézoélectrique (AlN, ZnO ou PZT) pour réaliser des résonateurs et des filtres.



- Les filtres BAW sont plus performants que les filtres SAW :
 - Meilleurs facteurs de qualité.
 - Fréquence d'utilisation jusqu'à 15 GHz.
 - Tenue à la puissance RF et à la T° → duplexer BAW.
 - Meilleure réjection hors bande et moins de pertes IL.
 - Co-intégration avec les IC possible.
- Actuellement beaucoup de travaux pour utiliser les résonateurs BAW comme référence de fréquence !



Leti/Csem 2005



leti

MINATEC

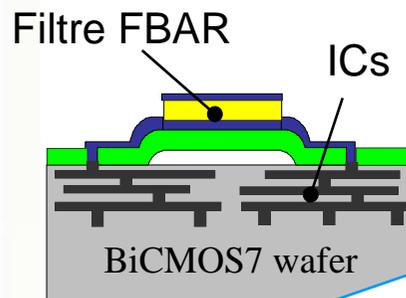
2007



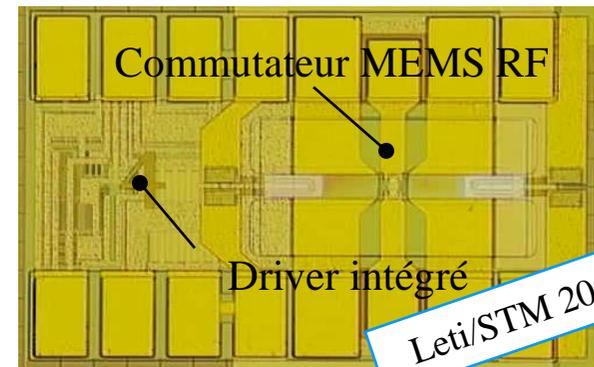
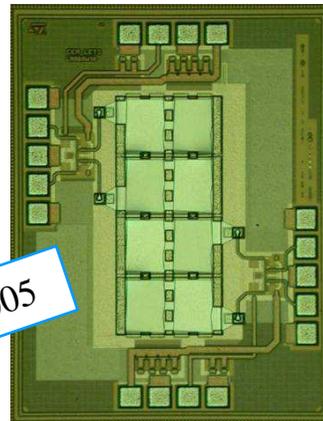


Intégration sur silicium

- L'intégration monolithique (**SOC ou System on Chip**) du module d'émission/réception RF sur un même substrat silicium est le but ultime de tous les fondeurs :
 - Réduction importante de la taille globale du module RF.
 - Réduction des effets parasites dus aux connexions.
- Les MEMS RF ont pour vocation de remplacer les composants RF encore externes : filtres RF, duplexeurs ou commutateurs d'émission/réception ou quartz.



Leti/Csem 2005

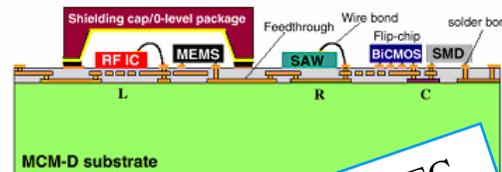


Leti/STM 2003

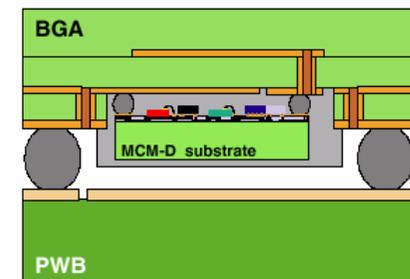
- Une autre stratégie d'intégration beaucoup plus souple est le **SiP (System in Package)** → intégration des MEMS RF avec les passifs sur un substrat dédié (par exemple le substrat verre de la solution IPAD de STMicroelectronics).



STMicroelectronics



IMEC

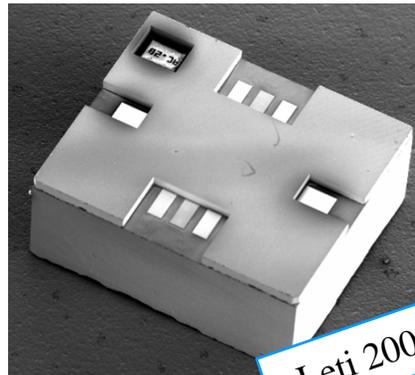
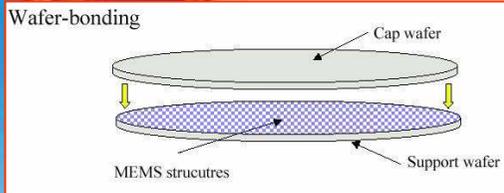




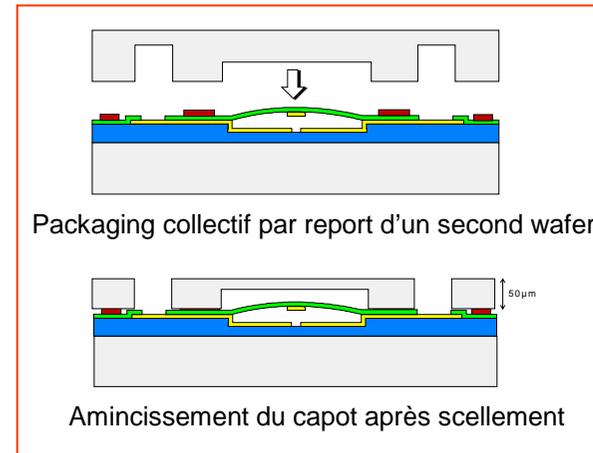
Packaging

- Rôle essentiel du packaging pour les MEMS RF :
 - Protection des parties mobiles et garant de la fiabilité à long terme (contamination et oxydation des contacts).
 - Aucun impact sur les performances → scellement avec T° basse et sans dégazage dans l'enceinte.
 - Le coût du packaging doit rester raisonnable.

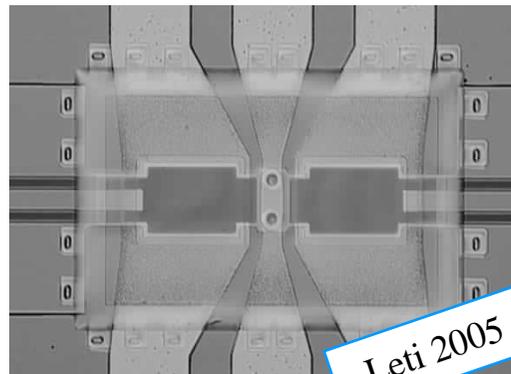
- Wafer level packaging



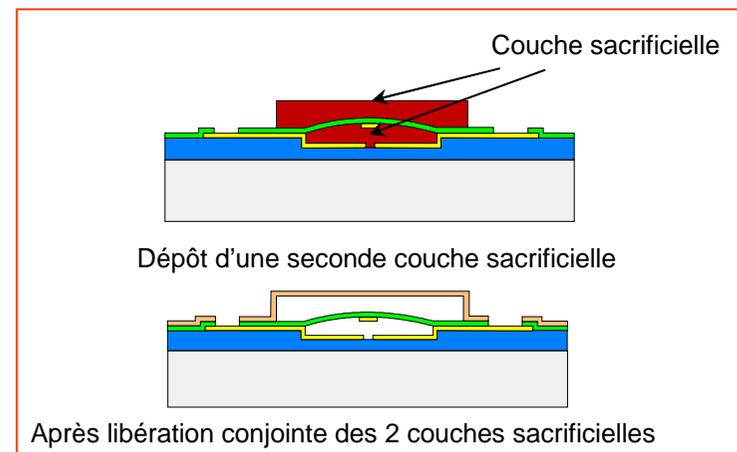
Leti 2005



- Thin film packaging



Leti 2005

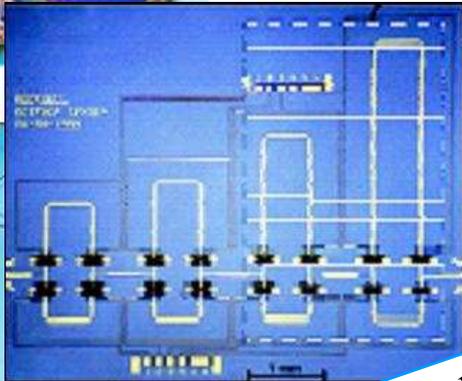




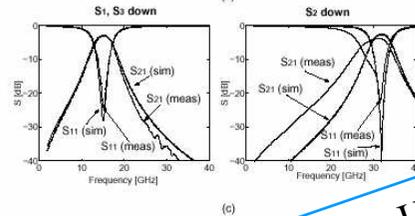
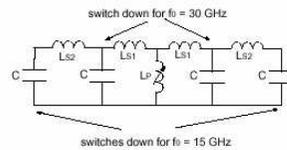
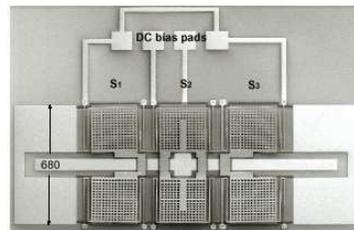
Systemes à base de MEMS RF

- Quelques exemples de réalisations de systemes basés sur les MEMS RF.

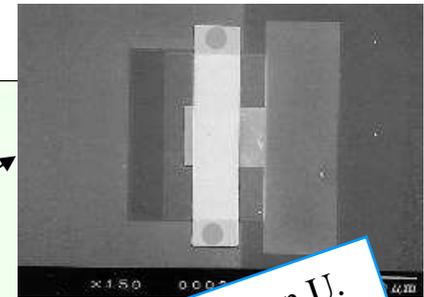
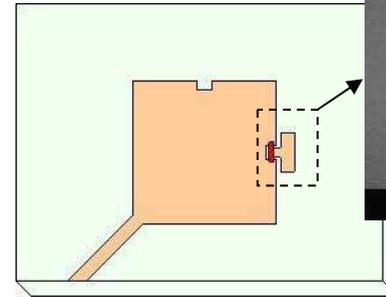
Sous systemes RF	
	Matrices de commutation (SPST, SPDT, DPDT, SPNT, N×N)
	Commutateurs d'émission/réception
	Commutateurs à haute isolation (instrumentation)
	Atténuateurs variables
	Déphaseurs (analogiques et digitaux)
	Antennes reconfigurables
	Réseaux d'adaptation
	Filtres reconfigurables
	Antennes à diversité de fréquence, de polarisation ou de diagramme
	Oscillateurs à faible bruit de phase (fixe ou variable)



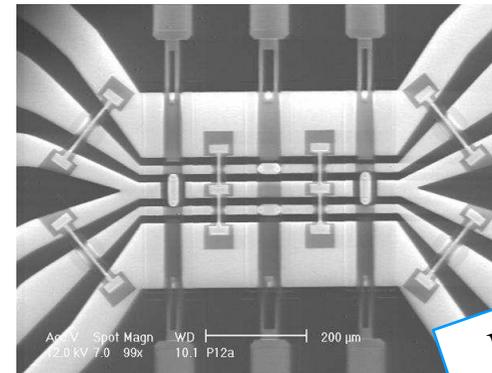
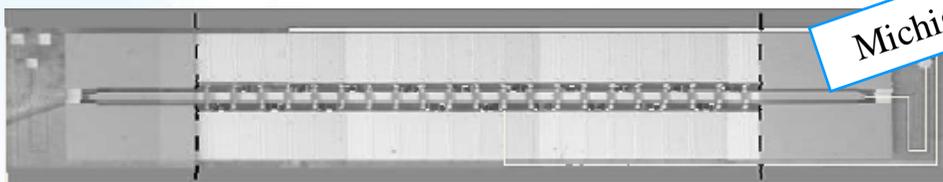
Rockwell



Michigan U.



Michigan U.

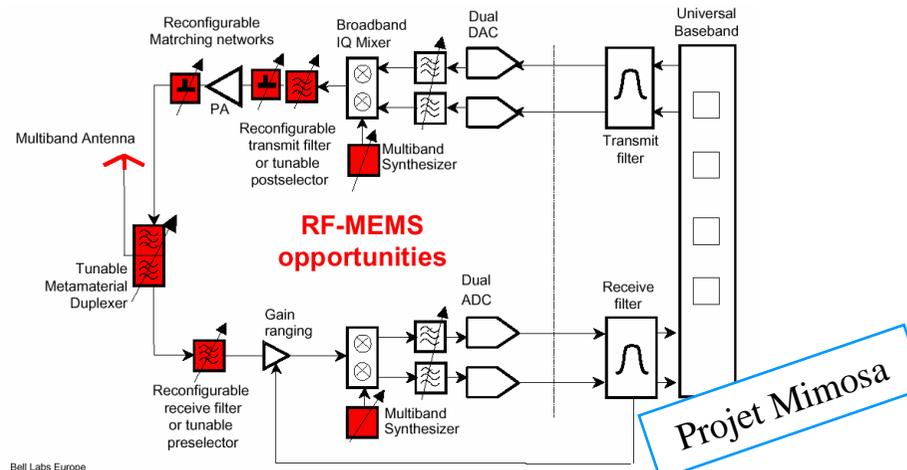


Leti

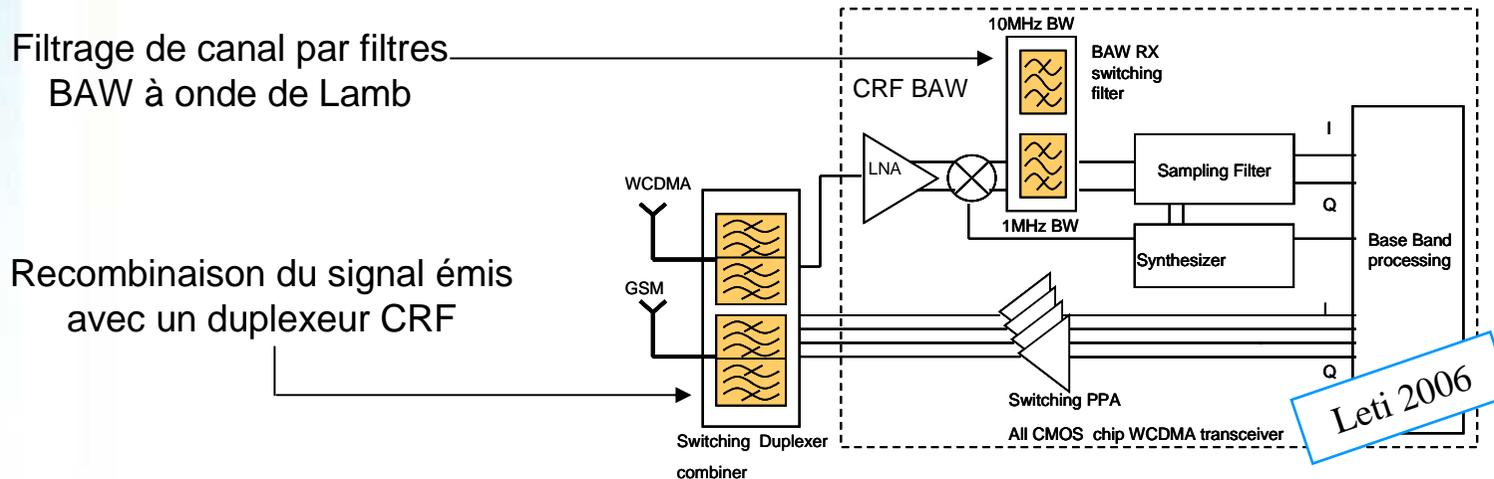


Architectures à base de MEMS RF

- Architectures « classiques » de type zéro-IF ou superhétérodyne rendues reconfigurables grâce aux MEMS RF.



- Approches plus innovantes en tirant profit des nouvelles fonctionnalités apportées par la technologie MEMS RF.



Filtrage de canal par filtres
BAW à onde de Lamb

Recombinaison du signal émis
avec un duplexeur CRF



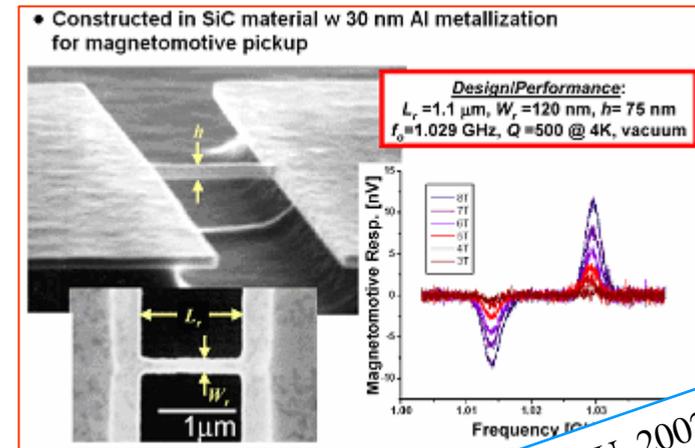
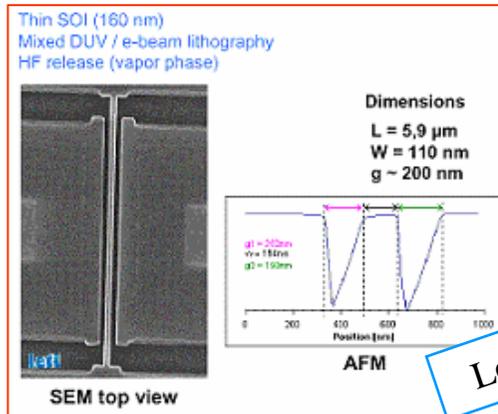
MINATEC
2007



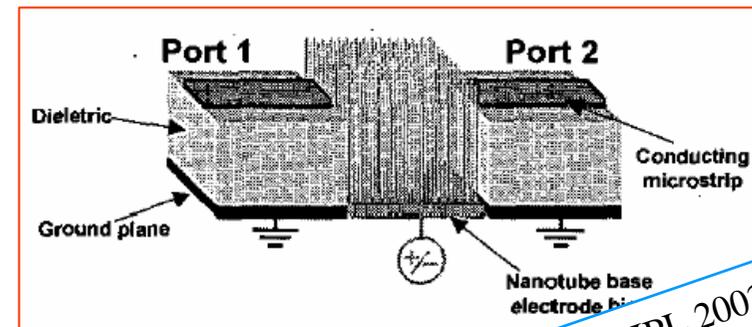
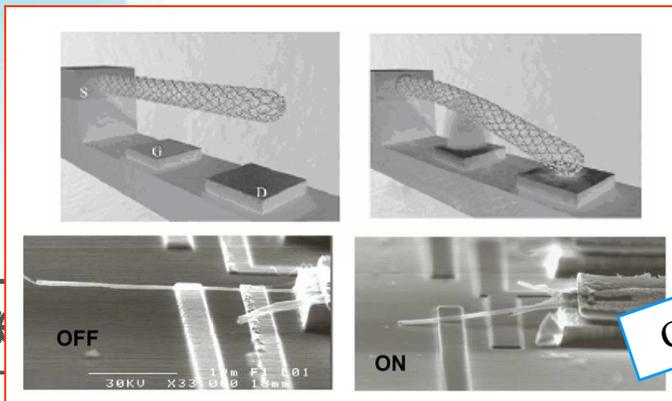


Les NEMS RF

- NEMS = MEMS à l'échelle nano (< 200 nm).
- Nombreux avantages : temps de commutation, forces d'actuation plus faibles (consommation plus basse), meilleure densité d'intégration.
- Pas seulement une réduction de taille mais aussi des procédés de fabrication différents et apparition d'autres effets (forces de Casimir ou effets de surface).
- Les résonateurs à gap nanométriques



- Les Nanotubes de carbone





leti

MINATEC

2007



Conclusion

- La technologie MEMS RF entre dans une phase de maturation industrielle
→ de plus en plus d'études sur le packaging, la fiabilité des contacts ou la tenue à la puissance RF.
- Les premiers composants sont désormais disponibles à la vente
 - Filtres BAW : Agilent, Infineon, EPCOS, ...
 - Commutateurs : Radant, Wispry, Teravicta
 - Capacités variables : Wispry, Philips (?)
- Les NEMS RF sont la prochaine évolution des composants MEMS RF mais ils sont encore loin d'une quelconque industrialisation.
- Il semble évident que les MEMS RF trouveront des débouchés industriels et modifieront en profondeur les architectures des systèmes RF dès que la fiabilité à long terme sera assurée et que les coûts de fabrication seront maîtrisés (packaging),

micro et nanoélectronique
microsystèmes
intelligence ambiante
biologie et santé
chaîne de l'image



Merci de votre attention

Loyauté
Envie d'entreprendre
Travail en équipe
Loyauté Innovation
Envie d'entreprendre
Travail en équipe
Innovation

leti

MINATEC
POLE D'INNOVATION

