

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electronique

Thème :

Etude sur la conception des filtres RF-MEMS

Soutenu publiquement le **19 Juin** devant le jury composé de :

Président de jury : Pr. M.TRABELSI

Réalisé par

Examineur: Dr. H.BOUSBIA-SALAH

Hichem MOUNSSI

Promoteur : Dr. M.ADNANE

Promotion : Juin 2013

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur, M.ADNANE, qui, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce master, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer

Je tiens à remercier Monsieur M.TRABELSI, d'avoir accepté de présider le jury.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur H.BOUSBIA-SALAH, d'avoir bien voulu accepter d'examiner notre travail.

Mes remerciements à tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, spécialement ceux du département d'Electronique, pour leur apport en savoir.

Je souhaite adresser aussi mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce master ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin,

J'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et mes amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragé au cours de la réalisation de ce master.

Dédicace

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire « Ya Kayoum ».

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère . . .

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

A mes frères et à mes amies.

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail

ملخص

يعتبر المرشح عنصرا رئيسيا في جميع اجهزة الاستقبال الراديوية ونظم الاتصالات، لأنه يقوم بتصفية شريط الترددات والمحافظة على نطاق التردد المفيد من اجل معالجة صحيحة فيما بعد.

الهدف من هذه المذكرة هو اجراء دراسة وتقديم استراتيجية لتصميم مرشح بتقنية MEMS في مجال الترددات الراديوية.
كلمات مفتاحية: مرشح ، ترددات راديوية، الانظمة المصغرة.

Résumé

Le filtre présente un élément clé dans les systèmes de réception radiofréquence car il limite la bande de fréquence seulement à la bande utile

Le but de ce master et l'étude d'une réalisation d'un filtre avec la technologie MEMS dans le domaine radiofréquence.

Mots clés : filtre, RF (radiofréquence), microsysteme MEMS

Abstract

The filter is a key component in radio frequency receiver systems because it limits the frequency band only the useful band

The purpose of this master is to study the realization of a filter with MEMS technology in the RF field

Key words: filter, RF field, microsystem MEMS.

Table des matières

Remerciements	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Tables des figures	VII
Introduction Générale.....	7
I.Chapitre1	8
Les systèmes de réception Radiofréquences	8
I.1-Introduction	8
I.2 -Les Systèmes de réception radiofréquence.....	8
I.2.1-Blocs électronique.....	8
I.2.1.1-Les antennes	8
I.2.1.3 -Les amplificateurs faible bruit.....	9
I.2.1.4 -Les mélangeurs.....	9
I.3-Système de réception monovoie	10
I.3.1 Le récepteur superhétérodyne.....	10
I.4 Récepteurs multivoies non-simultanées	11
I.4.1 Récepteur partiellement partagé :	12
I.4.2 Récepteurs utilisant un seul frontal RF :	12
I.5 Récepteurs Multivoies simultané	13
I.5.1 Empilement de chaines de réception radiofréquence	13
I.6 Conclusion	13
Chapitre2	14
La technologie des MEMS	14
II.1 Introduction	14
II.2 définition.....	14
II.3 Conception d'un microsystème	15
II.3.1 Technologie de fabrication	16
II.3.2 Propriétés physiques des matériaux	16
II.3.3 Phénomènes physiques dominants.....	16
II.3.4 Principales étapes de la conception.....	16
II.3.4.1 Étude de faisabilité	17

II.3.4.2 Modélisation et simulations.....	18
II.3.4. 3 Construction des masques	18
II.3.4.4 Fabrication du microsystème	18
II.3.4.5 Analyse des résultats de test et caractérisation.....	18
II.4 Technologies de fabrication.....	19
II.4.1Types de substrats	19
II.2 Matériaux couramment utilisés	20
II.3 Procédés de base.....	20
II.5 Domaines d’application.....	22
II.5.1 Microsystèmes radiofréquence	22
II.5.2 Microsystèmes optiques.....	23
II.5.2 Capteurs	24
II.6 Conclusion	25
Chapitre3	26
Application des filtres RF dans La technologie des MEMS	26
III.1 Introduction	26
III.2-Types des filtres RF	27
III.2.1 -Les filtres céramiques.....	27
III.2.2 -Filtre à onde acoustique (surface Acoustic Wave).....	28
III.2.3 -Filtre RF-MEMS	28
III.3 Vue d'ensemble sur la technologie MEMS dans les applications RF	29
III.3.1 Composants passifs.....	29
III.3.2 Commutateurs RF.....	29
III.4 Filtre passe-bande ajustable a la technologie MEMS	31
Conclusion Générale	34
BIBLIOGRAPHIE	35

Tables des figures

Figure I .1: Architecture d'un récepteur superhétérodyne	11
Figure I.2 : architecture d'un récepteur partiellement partagé	12
Figure I.3: architecture d'un récepteur multivoies utilisant un seul frontal	12
FigureI.4 : Empilement de chaine de réception radiofréquence	13
Figure II.1 Représentation schématique d'un microsysteme	15
Figure II.2 Principe de conception d'un microsysteme	17
Figure II.3schéma d'un substrat « SOI »	20
FigureII.4 exemple des motifs obtenus par gravure profonde	22
Figure II.5 Schéma de deux micro-miroirs juxtaposés du DMD	24
Figure III.1 : Architecture superhétérodyne d'une chaîne d'émission-réception	26
Figure III.2 filtre céramique	28
FigureIII.3 Schématique d'un module RF	30
Figure III.4 schéma de la capacité variable	31
Figure III.5 filtre ajustable	31
FigureIII.6 image du filtre réalisé	32
Figure III.7 filtre dans la plaque	32
Figure III.8 Plusieurs filtres sur la même plaque	33

Introduction Générale

Les systèmes de télécommunications sans fil ont évolué de façon rapide depuis une vingtaine d'année. La conception de ces systèmes est soumise à de nombreux challenges :

- le coût de production,
- les techniques d'intégration des composants,
- l'encombrement

La technologie monolithique et plus précisément les procédés de fabrication de circuits Silicium (**CMOS** et **BiCMOS**) offrent depuis plusieurs années une possibilité de pallier à ce type de difficultés. Ils permettent aujourd'hui l'intégration de plusieurs fonctions RF et mixte sur une seule puce.

Malheureusement, la conception de certaines fonctions RF pose encore problème. C'est le cas des filtres radiofréquences qui constituent les éléments essentiels du système de télécommunication GSM. Les exigences demandées par ces filtres conduisent à étudier des solutions de filtres actifs, car les structures passives (à cavité ou diélectrique ou à ondes acoustiques de surface) ne permettent pas d'avoir de meilleures performances en pertes d'insertion, en sélectivité, en encombrement et en accordabilité fréquentielle.

Dans ce rapport on parlera sur la nouvelle technologie de réalisation des filtres RF, c'est la technologie des microsystemes MEMS (micro-electro-mechanical systems), dans le premier chapitre sera exposé les filtres radiofréquences (RF) en général ainsi que leurs domaines d'applications, dans le second chapitre on va détailler la technologie de réalisation MEMS spécialement pour les filtres radiofréquences, dans le dernier chapitre, un état de l'Art sera présenté pour définir l'état d'avancement de cette technologie dans le domaine des filtre RF

I.Chapitre1

Les systèmes de réception Radiofréquences

I.1-Introduction

Le développement des systèmes de communication modernes conduit aujourd'hui à une évolution importante dans les domaines de l'électronique RF et microonde. Cette évolution est liée à plusieurs exigences telles que l'intégration, le coût et la fiabilité des circuits.

Dans l'architecture des systèmes modernes la fonction de filtrage présente un rôle principal d'ont l'optimisation et l'intégration présente un problème majeur

Nous introduisons ci-après l'importance et la nécessité des filtres RF dans les systèmes de télécommunications et l'intérêt de chercher de nouvelles solutions alternatives avec des filtres entièrement intégrables

I.2 -Les Systèmes de réception radiofréquence

I.2.1-Blocs électronique

I.2.1.1-Les antennes

Une antenne est un dispositif métallique qui sert à rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques, et par conséquent offre une interface entre l'espace libre et la partie électronique du récepteur, et peut être considérée comme un système réalisant l'adaptation d'impédance entre l'espace libre et l'entrée du récepteur.

L'antenne est caractérisée par différents paramètres qu'on peut classer soit en caractéristique électrique soit en caractéristiques de rayonnement, mais on peut dire que les caractéristiques essentielles d'une antenne sont la bande passante, le gain, la directivité, l'angle d'ouverture du faisceau, la polarisation et la température équivalente de bruit.

D'une manière générale, la bande passante d'une antenne est la bande de fréquence pour laquelle les performances radioélectriques restent conformes à une norme imposée. Cependant, il faut souligner que certaines antennes dites –multibande- peuvent fonctionner correctement sur des segments discontinus de bandes de fréquences.

I.2.1.2 -Filtre RF et FI

Comme toute chaîne de réception le signal utile est entouré de signaux parasites captés par l'antenne, dans le cas où le spectre de l'information est suffisamment isolé par rapport au spectre des autres signaux, il est possible d'extraire le signal utile par filtrage. On peut définir un filtre comme étant un système linéaire dont le rôle est de modifier le spectre sans y ajouter de nouvelles informations.

Dans la chaîne de réception il existe deux types de filtre : le filtre RF (Radiofréquence) et le filtre FI (Fréquence intermédiaire). Le filtre RF a pour rôle de limiter la plage de travail à la bande voulue et de supprimer les autres signaux, cette plage est la bande passante du filtre, ce filtre se situe entre l'antenne et l'amplificateur faible bruit, il est défini comme étant un filtre de présélection. Un deuxième filtre est monté après le mélangeur afin de laisser passer uniquement le signal FI utile et supprimer les fréquences indésirables générées après le mélange des signaux RF et de l'oscillateur local (OL) ; Il faut dire aussi que ces filtres apportent des atténuations de la puissance utile ; ce phénomène est dénommé perte d'insertion (Insertion Loss)

I.2.1.3 -Les amplificateurs faible bruit

Un amplificateur faible bruit (LNA de l'anglais Low Noise Amplifier) est un élément critique de la chaîne de réception RF chargé d'amplifier les signaux utiles ayant une très faible puissance à la sortie de l'antenne de réception. Il est souvent placé à proximité de l'antenne, il doit dégager un rapport signal sur bruit très important en sortie pour faciliter le traitement de l'information du signal RF par les composants en aval ; pour cette raison, on assimile son rôle à celui d'un préamplificateur.

I.2.1.4 -Les mélangeurs

Le mélangeur transpose le signal en bande de base vers les fréquences RF pour la chaîne d'émission et le signal RF vers le signal en bande de base pour la chaîne de réception. Un mélangeur peut être une simple diode (cas de la détection AM directe) ou bien un circuit beaucoup plus complexe comme une cellule de Gilbert.

Le choix se fait selon le besoin en sensibilité des circuits RF. Le mélangeur est un dispositif à deux entrées et une sortie qui effectue sur les signaux appliqués sur les entrées une opération non-linéaire de multiplication.

Dans un système linéaire comme un filtre par exemple, on retrouve en sortie des fréquences identiques à celles qui ont été injectées à l'entrée. Un dispositif non-linéaire par contre fait apparaître en sortie des fréquences nouvelles inexistantes dans les signaux d'entrée. Ces nouvelles fréquences sont évidemment liées mathématiquement aux fréquences d'entrée.

Le processus de mélange permet le transfert d'énergie d'une fréquence d'entrée (f_{RF}) vers une fréquence de sortie (f_{Fi}) à l'aide d'un second signal d'entrée, appelé oscillateur local (f_{OL}), si les signaux d'entrées sont parfaitement sinusoïdaux on obtient des signaux de sorties sinusoïdaux dont la fréquence est définie par

$$f_{Fi} = mf_{RF} + nf_{OL}$$

m et n sont des nombres entiers pouvant prendre une infinité de valeurs, positives et négatives.

I.3-Système de réception monovoie

A la réception des signaux radiofréquence, le signal reçu par l'antenne doit être transposé en bande de base afin de pouvoir être traité numériquement. On distingue plusieurs types d'architectures permettant cette transposition on parlera essentiellement sur le récepteur Superhétérodyne

I.3.1 Le récepteur superhétérodyne

Grâce à ses bonnes performances en termes de sélectivité et de sensibilité, cette architecture de récepteur proposée par Armstrong en 1928 est la plus utilisée. Le principe de fonctionnement consiste en une première transposition de la bande de réception autour d'une fréquence intermédiaire fixe, puis une transposition en bande de base en utilisant un oscillateur local ayant une fréquence égale à celle autour de laquelle est centré le canal souhaité. La première transposition du spectre se réalise par la multiplication du signal RF avec le signal issu d'un oscillateur local. La deuxième transposition est réalisée par un démodulateur composé d'une paire de mélangeurs montés en quadrature. Le synoptique du récepteur superhétérodyne est présentée dans la **figure I.1**

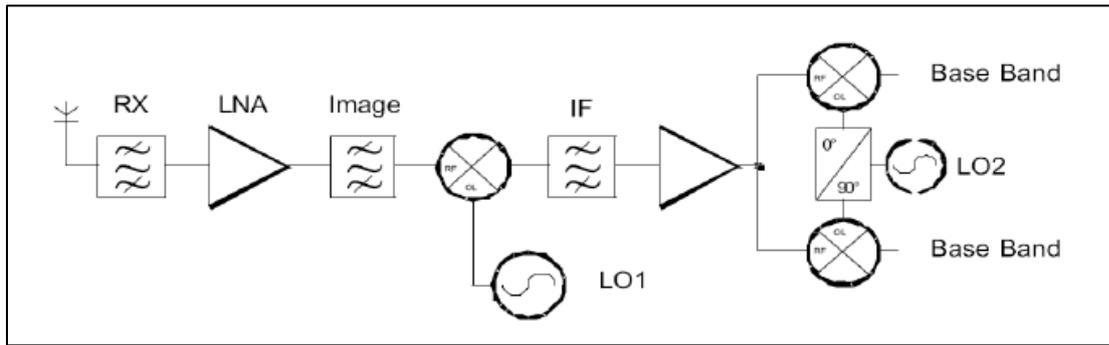


Figure I.1: Architecture d'un récepteur superhétérodyne

Cette structure présente plusieurs avantages:

- le filtrage et l'amplification progressive des signaux interférents de forts niveaux permettent de mieux gérer les contraintes de linéarité du récepteur ;
- les phénomènes de défauts d'orthogonalité (IQ) des blocs IQ de translation en fréquence sont faibles, leur impact sur la qualité de réception étant insignifiants.
- l'influences des composantes DC parasites est insignifiante; la maîtrise de la technique de réalisation

Cependant, même si cette architecture présente les meilleures performances dues à la très bonne maîtrise du filtrage et de l'amplification, les inconvénients majeurs sont liés aux problèmes de réjection de la fréquence image. En effet, le grand nombre de composants électroniques associés avec la non-intégration sur puce des filtres RF (en particulier les filtres de réjection de la fréquence image) rendent cette structure très lourde en termes de complexité. La présence des filtres de réjection de la fréquence image ou filtres FI (entre la sortie du LNA et l'entrée du premier mélangeur dans la Fig) est impérative pour ce genre de structures.

Afin de s'affranchir de l'inconvénient de l'utilisation des filtres FI, de nouvelles architectures de récepteurs radiofréquence ont été proposées telles que celles de Hartley et Weaver.

I.4 Récepteurs multivoies non-simultanées

Les deux types qu'on détaille dans ce rapport sont le récepteur partiellement partagé et les récepteurs utilisant un seul frontal RF

I.4.1 Récepteur partiellement partagé :

Ces récepteur utilisent partiellement le même frontal RF mais ayant aussi des blocs implémenté en parallèle. La figure I.2 représente l'architecture de ce type de récepteur.

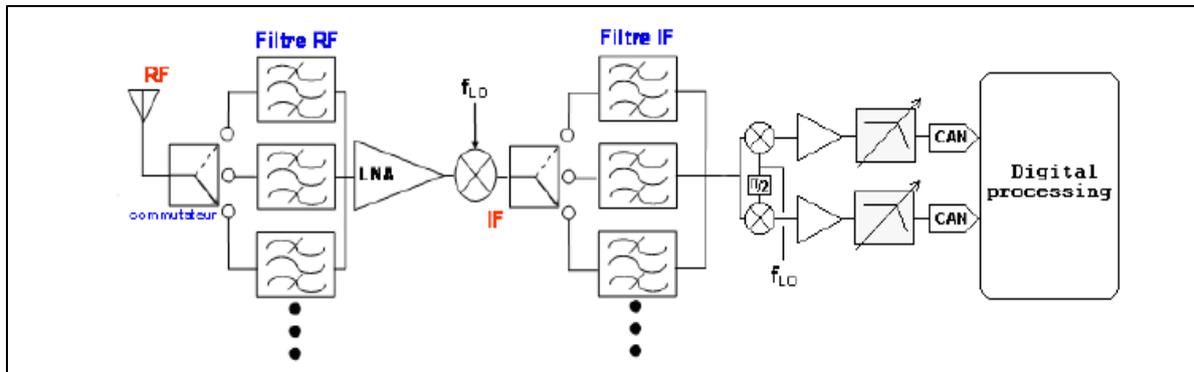


Figure I.2 : architecture d'un récepteur partiellement partagé

I.4.2 Récepteurs utilisant un seul frontal RF :

Les architectures de récepteurs utilisant un seul frontal RF sont présentées sur la figure. Le nombre de composants électroniques utilisés pour la réalisation de ce type de récepteur est réduit, et par conséquent on pourrait conclure que la complexité est ainsi réduite. Mais, suite aux contraintes imposées par la compatibilité avec plusieurs standards, la complexité et la consommation de chacun de ces blocs électroniques « multivoies » sont augmentées par rapport à celles des blocs « monovoie ». En règle générale, les chaînes uniques capables de traiter plusieurs types de signaux imposent l'utilisation de composants électroniques surdimensionnés.

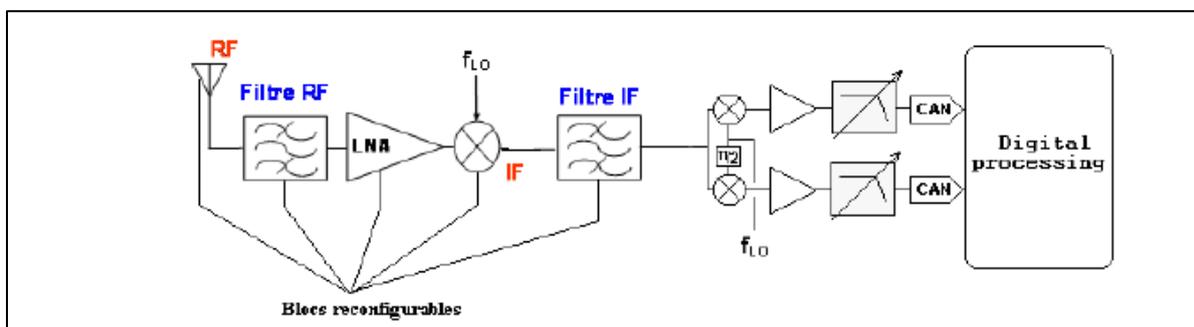


Figure I.3: architecture d'un récepteur multivoies utilisant un seul frontal

I.5 Récepteurs Multivoies simultanément

I.5.1 Empilement de chaînes de réception radiofréquence

La réception simultanée de plusieurs signaux est indispensable dans plusieurs scénarios d'utilisation impliquant les transmissions radiofréquence.

L'architecture empilement de chaînes de réception radiofréquence qui est représenté sur la figure utilise des chaînes de réception dédiées implantées parallèlement, donc autant de frontaux que de voies.

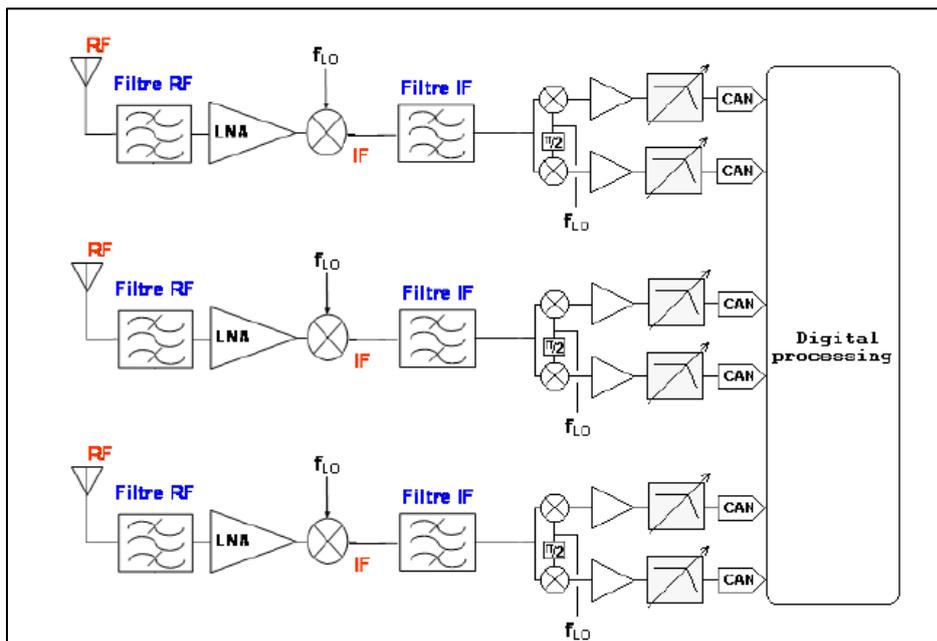


Figure I.4 : Empilement de chaîne de réception radiofréquence

La réception multi-antenne du même signal radiofréquence permet d'augmenter la qualité de la réception suite à un traitement numérique réalisé en bande de base. Ce traitement recombine les composantes en bande de base des signaux radiofréquences reçus sur les différentes antennes afin d'augmenter le SNR du signal en bande de base résultant. Une des conditions nécessaires au bon fonctionnement d'un tel traitement est la simultanéité de la réception multi-antenne des différentes copies du signal radiofréquence.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, et dans la première partie nous avons décrit les principaux éléments constituant une chaîne de réception, nous avons commencé par l'antenne jusqu'au filtre FI, en passant par le filtre RF d'entrée, l'amplificateur faible bruit, le mélangeur et l'oscillateur local.

Chapitre 2

La technologie des MEMS

II.1 Introduction

Les microsystemes, nés vers la fin des années 1980 et commercialisés à partir des années 1990, connaissent actuellement un essor important. Les technologies des microsystemes ont en effet été identifiées comme étant les plus prometteuses pour le vingt-et-unième siècle, et comme pouvant révolutionner à la fois le monde industriel et celui du consommateur en combinant la microélectronique et la technologie de micro-fabrication.

Dans ce chapitre on commence par l'explication des techniques de conception, décrire les méthodes de fabrications ainsi que les différents domaines d'applications.

II.2 définition

Les **microsystemes**, au sens de la définition européenne du terme, sont des dispositifs multifonctionnels miniaturisés intelligents. Ils associent des éléments mécaniques, optiques, électromagnétiques, thermiques et fluidiques à de l'électronique. Ils assurent des fonctions de capteurs pouvant identifier des paramètres physiques de leur environnement (pression, accélération, ...) et/ou d'actionneurs pouvant agir sur cet environnement.

Les microsystèmes se divisent essentiellement en deux catégories :

-ceux qui détectent l'information, appelés **capteurs**. Ils récoltent une information locale telle que thermique, biologique, chimique et optique. Bien que l'on associe souvent le terme microsystème à « **système ayant des parties mobiles** », certains microsystèmes ne présentent pas de parties mobiles (microsystèmes radiofréquence, par exemple) ;

- ceux qui peuvent répondre à l'information, ou agissent, tels que les **actionneurs**. La réponse peut être un mouvement, un filtrage,...

Les microsystèmes sont obtenus par des techniques de micro-usinage collectives issues de la fabrication des circuits intégrés (dépôt de matière en couches minces, photolithographie, gravure...). Les microstructures de base servant d'éléments sensibles ou d'actionneurs ont une taille allant de quelques **micromètres** à quelques **millimètres**.

Dans leur forme courante, les microsystèmes consistent en des structures mécaniques, des capteurs, des actionneurs et des composants microélectroniques, tous intégrés sur une même puce. Cette interaction est présentée sur la **figure II.1**.

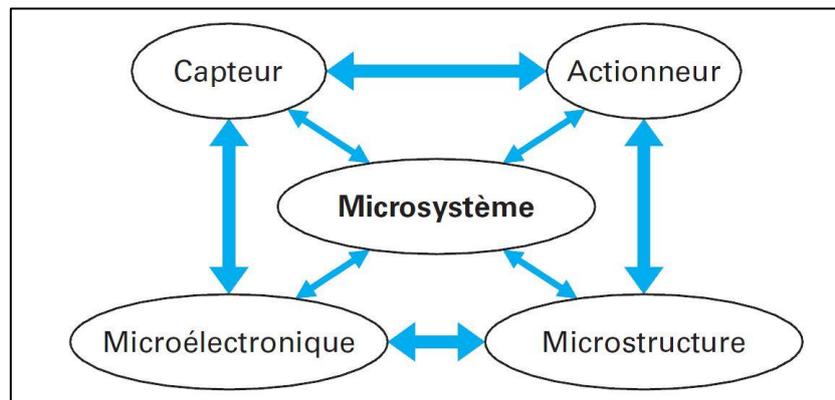


Figure II.1 Représentation schématique d'un microsystème

II.3 Conception d'un microsystème

La conception d'un microsystème part souvent de l'idée de **miniaturiser un système conventionnel existant**. Mais l'objet final miniaturisé ressemble très peu à son homologue macroscopique pour trois raisons principales :

-La technologie de fabrication change

-Les propriétés physiques des matériaux changent

-Les phénomènes physiques dominants changent

II.3.1 Technologie de fabrication

D'une technologie de fabrication d'objets discrets en trois dimensions, on passe à une technologie de fabrication par duplication planaire. Le niveau de complexité des formes qui peuvent être intégrées dans ce plan est considérablement réduit et dépend souvent du matériau gravé. Avec du silicium, les formes gravées dépendront ainsi de l'orientation du cristal et de la technique de gravure.

II.3.2 Propriétés physiques des matériaux

Ces propriétés physiques sont dépendantes de la méthode de dépôt des matériaux ainsi que des températures subies au cours de la fabrication. À titre d'exemple, la dureté d'un métal sera généralement de plus en plus importante suivant que le métal est électrolysé, qu'il est massif ou qu'il est pulvérisé. Cette même dureté dépendra aussi des différents recuits en température qu'aura subi le matériau lors des autres étapes de fabrication.

II.3.3 Phénomènes physiques dominants

Le microsystème étant par nature un objet planaire, les phénomènes de surface s'imposent au détriment des effets de volume : emmagasiner de la chaleur est un exercice impossible car la dissipation de chaleur est excellente. Les tensions de surface deviennent dominantes alors que l'importance des phénomènes inertiels est considérablement réduite. Certains microsystèmes capables de supporter des facteurs de charge de 100 g seront ainsi détruits au contact d'une simple goutte d'eau.

II.3.4 Principales étapes de la conception

La conception d'un microsystème est décomposée en quatre étapes principales décrites par la **figure II.2**

Les spécifications « Produit » (cahier des charges produit) regroupent l'ensemble des caractéristiques techniques du microsysteme à concevoir. Elles incluent aussi une vue d'ensemble du produit final avec son interface électrique, sa solution de packaging et le prix de revient visé par composant. Ce prix donne une idée de la surface maximale que devra occuper le microsysteme ainsi que du nombre et de la complexité des étapes pour le fabriquer.

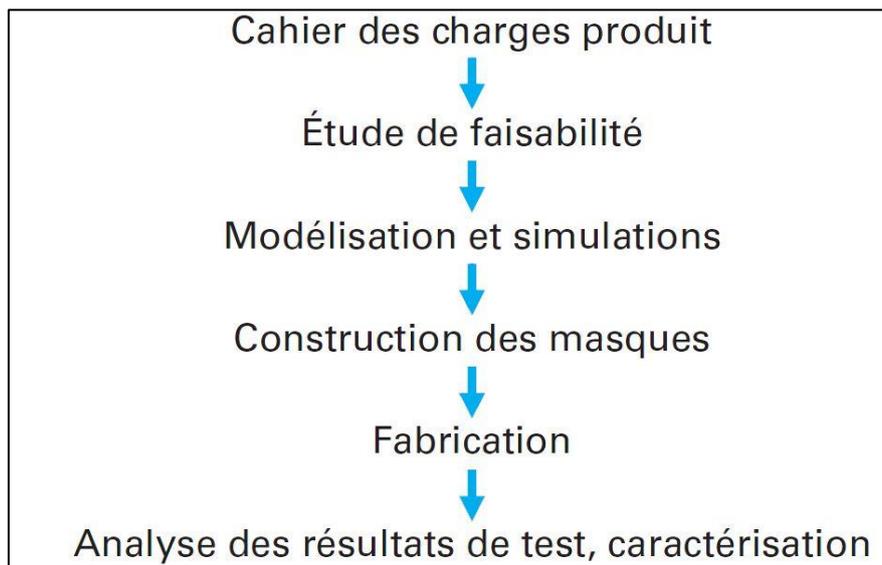


Figure II.2 Principe de conception d'un microsysteme

II.3.4.1 Étude de faisabilité

À partir de ce cahier des charges, la première étape de conception est l'étude de faisabilité du microsysteme qui consiste d'abord à déterminer les méthodes de détection ou d'actionnement qui semblent les plus adaptées pour répondre aux spécifications techniques. On génère ensuite un empilement, c'est-à-dire une succession d'étapes élémentaires qui sont nécessaires à la fabrication de l'objet. Puis, on évalue grossièrement les performances atteignables avec des méthodes de calcul préférentiellement analytiques pour avoir rapidement une idée du comportement du composant.

II.3.4.2 Modélisation et simulations

Quand l'étude de faisabilité est validée, on passe alors à la construction de l'objet 3D à l'aide d'outils de conception assistée par ordinateur (CAO) puis à l'analyse fine du comportement de l'objet en utilisant des méthodes de calculs numériques.

II.3.4.3 Construction des masques

Du modèle répondant aux spécifications sont extraits les dessins des masques (appelés aussi « *layout* ») qui seront utilisés pour les étapes de photolithographie. Sur les masques sont aussi ajoutées plusieurs structures dédiées au test qui permettront de relever des grandeurs physiques utiles au processus de fabrication ainsi qu'au produit.

II.3.4.4 Fabrication du microsysteme

Le microsysteme est ensuite réalisé selon l'empilement prévu. Selon la complexité de l'empilement, plusieurs itérations peuvent être nécessaires avant d'arriver à un démonstrateur fonctionnel.

II.3.4.5 Analyse des résultats de test et caractérisation

Après fabrication des premiers démonstrateurs, l'analyse des résultats de tests permet d'effectuer une première corrélation avec les performances simulées : on peut alors évaluer la pertinence du modèle et le calibrer. Les corrections seront alors réinjectées dans une nouvelle boucle de modélisation, fabrication et caractérisation pour aboutir à la seconde phase de démonstrateurs.

II.4 Technologies de fabrication

On décrit dans cette partie les différentes technologies de fabrication des microsystemes.

Les techniques les plus couramment utilisées pour réaliser des microsystemes sont le micro-usinage de volume et le micro-usinage de surface.

-Le **micro-usinage en volume** est une technique qui permet l'obtention de microstructures suspendues par gravure du substrat. Le terme de volume est utilisé ici puisque la gravure forme une cavité dans le volume du substrat sous les couches déposées.

- Le **micro-usinage en surface** est basé sur l'emploi de couches sacrificielles. Ces couches sont gravées entièrement en fin de fabrication par une étape de gravure sélective. Pendant la fabrication, les couches déposées sont une succession de **couches sacrificielles** (dioxyde de silicium ou résine, par exemple) et de couches structurales (comme le polysilicium ou un métal) que l'on grave au fur et à mesure de l'empilement.

II.4.1 Types de substrats

Les microsystemes sont fabriqués par un procédé collectif, ce qui permet de diminuer le coût du composant final, Les substrats utilisés pour les microsystemes se présentent, comme pour ceux utilisés en microélectronique,

II.4.1.1 Si/SOI

Le silicium est le substrat le plus couramment utilisé dans la fabrication des microsystemes. Outre son prix très compétitif, il présente l'avantage de pouvoir être gravé par des techniques bien maîtrisées, que ce soit par voie humide ou par voie sèche.

Alors que les circuits intégrés utilisent les propriétés électriques du silicium, les microsystemes utilisent ses propriétés mécaniques, éventuellement combinées à ses propriétés électriques.

Lorsque la fabrication utilise la technique de micro-usinage en volume, le substrat généralement utilisé est un substrat SOI [*Silicon on Insulator*]. Il est alors constitué par deux niveaux de silicium séparés par de l'oxyde (**figure II.3**).

II.4.1 .2 Autres

Dans la conception de microsystèmes, des matériaux autres que le silicium, comme l'AsGa, l'InP, l'AlN, le SiC et le quartz ne doivent pas être oubliés, surtout pour les applications où le silicium n'est pas tout à fait adapté.

L'AsGa, en particulier, représente la technologie la plus avancée après le silicium. Ce matériau est considéré comme un très bon candidat pour la conception des systèmes intelligents car il permet l'intégration des composants et des circuits électroniques avec des parties mécaniques et optiques.

Le schéma d'un substrat « SOI » est présenté dans la **figure II.3**

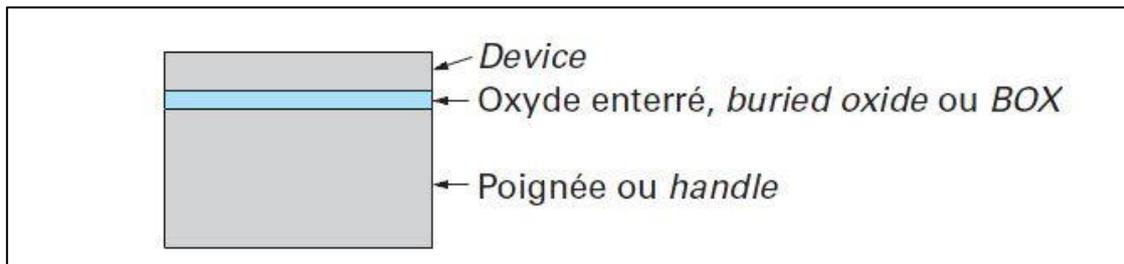


Figure II.3schéma d'un substrat « SOI »

II.2 Matériaux couramment utilisés

La nature des matériaux utilisés dans les microsystèmes dépend de leur application. Ils sont beaucoup plus variés que ceux utilisés en microélectronique.

De manière générale, même si certains matériaux sont utilisés à la fois en microélectronique et dans les microsystèmes, les couches utilisées dans les microsystèmes sont beaucoup plus épaisses (pouvant aller jusqu'à plusieurs **dizaines de micromètres**) que celles utilisées en microélectronique.

II.3 Procédés de base

Les procédés de base reposent tous sur le dépôt sur un substrat d'une couche mince de matériau (dépôt), et une gravure partielle de ce matériau par voie humide ou voie sèche.

On cite en revu les principales étapes de base nécessaires à la fabrication d'un microsystème

II.3.1 dépôt et électrolyse

Les matériaux nécessaires à la réalisation du produit sont obtenus par deux types de technologies :

-Le dépôt : le matériau est déposé en pleine plaque et les motifs sont définis ensuite par gravure.

-l'électrolyse : le matériau est déposé localement sur une sous-couche conductrice.

II.3.2 Photolithographie

La photolithographie sert, avec la gravure, à définir les motifs des différentes couches. Les dimensions critiques des motifs des microsystèmes sont le plus souvent nettement plus élevées que celles de la microélectronique

Lors de la fabrication des microsystèmes, on peut être amené à réaliser des motifs sur les deux faces du substrat, ce qui nécessite l'utilisation d'équipements spécifiques permettant un alignement entre la face avant et la face arrière. La précision d'alignement entre les deux faces est généralement de l'ordre de quelques **micromètres**.

II.3.3 Gravure

La gravure permet d'enlever de la matière (matériaux ou substrat) soit pour définir un motif, soit pour permettre aux pièces mobiles de bouger.

- La complexité des étapes de gravure lors de la fabrication des microsystèmes ne vient pas tant de la taille des motifs que de l'épaisseur des couches à graver, la **figure II.4** illustre un exemple des motifs obtenus par gravure profonde

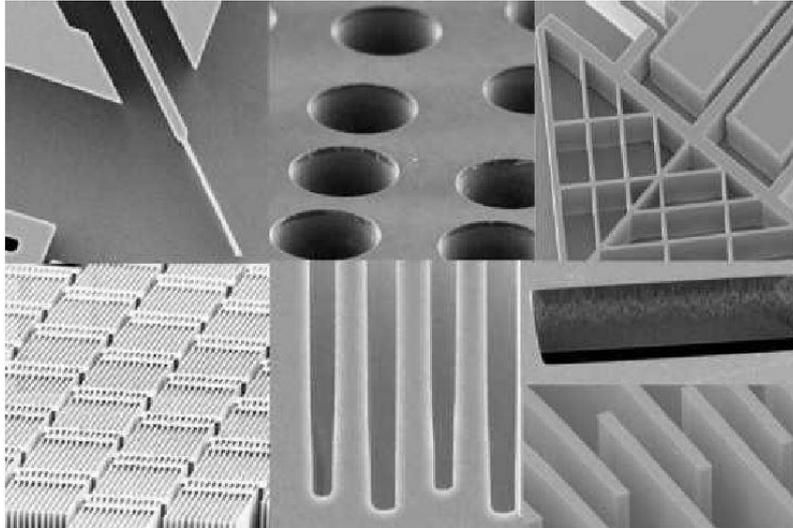


Figure II.4 exemple des motifs obtenus par gravure profonde

II.5 Domaines d'application

Les principaux domaines d'application sont :

- Les microsystemes radiofréquence
- microsystemes optiques

II.5.1 Microsystemes radiofréquence

Les premiers microsystemes disponibles sur le marché ont été les capteurs. Puis, au vu des propriétés électriques et mécaniques offertes par les technologies microsystemes, de nouveaux domaines d'applications ont été explorés.

Ainsi, une multitude de composants fonctionnant aux fréquences RF et millimétriques est apparue. Ces composants, souvent regroupés sous le terme commun **microsystemes RF** ou **RF-MEMS** en anglais.

L'énorme succès des microsystemes radiofréquence provient en grande partie de l'amélioration des performances et de la réduction des coûts liées à l'utilisation de techniques de fabrication collective. Il est de plus possible d'obtenir des circuits fortement intégrés, compatibles avec des composants passifs et/ou actifs, et participants donc aux progrès actuels des systemes portables de communication

II.5.2 Microsystèmes optiques

Les microsystèmes optiques sont employés pour des applications de capteurs interférométriques. Les micro-miroirs pivotants servent à la fabrication de scanners appliqués à la lecture de code-barres ou à l'enregistrement et à la lecture optique de données. Les réseaux de diffraction rentrent dans la composition de spectromètres. La capacité de reproduire des éléments de très faible taille par micro-usinage sert à la fabrication de micro-aiguilles ou de micro-ouvertures pour la microscopie en champ proche.

Dans le **domaine de l'imagerie**, les microsystèmes sont employés pour la fabrication d'optique adaptative équipant des caméras embarquées ou des télescopes pour corriger les aberrations dues aux perturbations atmosphériques et améliorer la résolution des images. Un analyseur de front d'onde commande un miroir déformable constitué d'une matrice de micro-miroirs actionnés indépendamment les uns des autres dans un mouvement de piston pour reformer le front d'onde.

Dans le domaine de **l'affichage**, des matrices de micro-miroirs pivotants sont utilisées pour la fabrication de vidéoprojecteurs. La matrice de micro-miroirs **DMD** (Digital Micromirrors Device) de Texas Instruments constitue sans aucun doute le microsystème optique le plus élaboré disponible dans le marché grand public. Le demi-million de micro-miroirs intégrés sur le même substrat pivotent d'une position à l'autre pour réfléchir ou non la lumière du projecteur vers un écran.

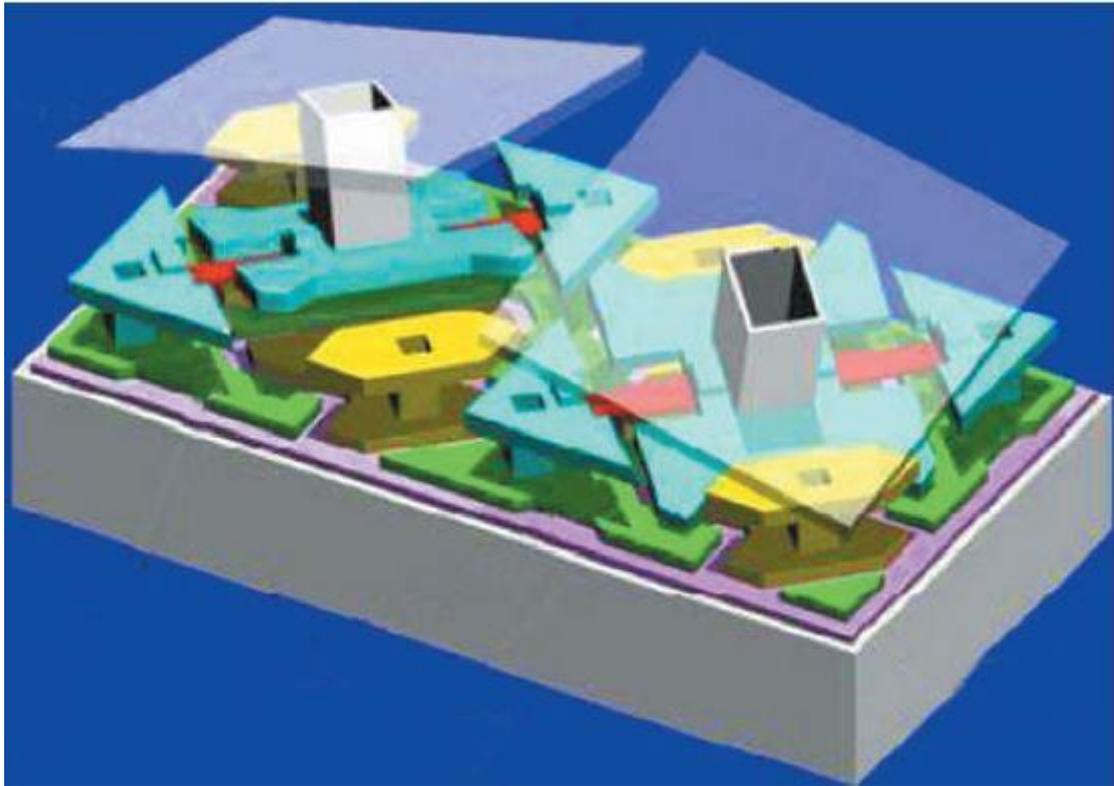


Figure II.5 Schéma de deux micro-miroirs juxtaposés du DMD

II.5.2 Capteurs

Le secteur de l'automobile est le plus gros consommateur de systèmes sensoriels.

La part de l'électronique embarquée dans les automobiles n'a en effet cessé de croître et les micro-technologies sont parfaitement adaptées pour remplacer les capteurs mécaniques et les intégrer à l'électronique.

Les capteurs microsystèmes permettent la multiplication des systèmes de mesures dans tous les sous-ensembles d'un véhicule :

- **sécurité** : capteurs d'accélération (accéléromètres) pour déclenchement des airbags, capteurs de pression pour la détection d'occupation des sièges, capteurs de pression pour les pneus, gyroscopes pour les systèmes d'anti-patinage, capteurs d'inclinaison (inclinomètres) et accéléromètres dans les essieux pour les suspensions actives (centrales inertielles)

- **environnement** : capteurs de gaz d'échappement

-**optimisation du moteur.**

-confort de conduite : capteur d'humidité pour la détection de la pluie et le déclenchement automatique des essuie-glaces, capteurs de lumière (allumage automatique des phares).

Le secteur **de l'aéronautique** est aussi un gros consommateur de capteurs. En remplaçant les capteurs actuellement embarqués dans les avions (flux, pression, accélération, température, centrale inertielle...) par des technologies microsystèmes, il sera possible grâce à leur grande miniaturisation d'en augmenter le nombre et de les intégrer aussi dans la structure même des appareils pour en surveiller les contraintes et les fatigues.

Dans le **secteur spatial**, si les microsystèmes restent encore peu utilisés à ce jour du fait du manque de retour d'expérience sur la fiabilité requise sur le très long terme, ils permettront de miniaturiser les satellites (programmes sur les micro et nano-satellites) via l'intégration des équipements de mesure et de diminuer les coûts de lancement. De nombreux travaux de recherche ont actuellement cette orientation.

Dans le **secteur biomédical**, des capteurs sont d'ores et déjà intégrés dans des systèmes implantés dans le corps humain : les accéléromètres des pacemakers pour mesurer l'activité physique du patient et asservir les battements cardiaques, des capteurs de pression artérielle et de flux pour les systèmes sanguins ou des capteurs chimiques pour la mesure du pH des fluides corporels. Ces microsystèmes peuvent parfois être combinés à des modules radiofréquence pour le diagnostic à distance.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre une première définition des microsystèmes a été donnée dans un second lieu on parle des différents procédés de fabrication et des différentes technologies des microsystèmes, à la fin nous on parle des différents domaines d'application de cette technologies.

Chapitre3

Application des filtres RF dans La technologie des MEMS

III.1 Introduction

Une chaîne d'émission-réception de type superhétérodyne peut être représentée d'une manière générale par le synoptique de la Figure III-1. L'antenne permet la réception des signaux, le commutateur permet de commuter entre le canal émission et réception. Dans le canal de réception le filtre RX-RF permet la sélection de la bande de réception, L'amplificateur faible bruit « LNA » amplifie le signal utile et préserve le système du bruit. Le filtre FI placé derrière le mélangeur effectue un filtrage à la fréquence intermédiaire avant la conversion en bande de base.

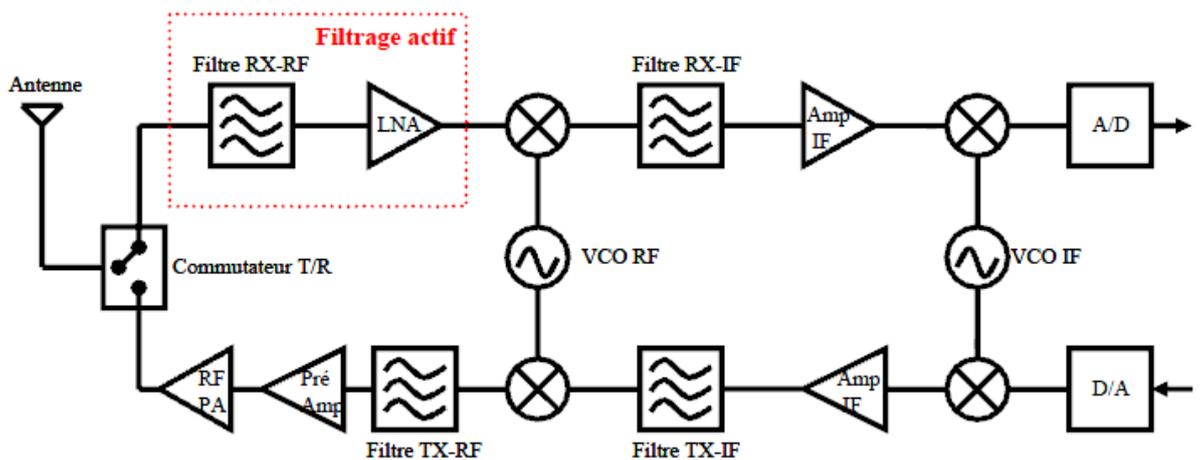


Figure III.1 : Architecture superhétérodyne d'une chaîne d'émission-réception

Actuellement, les filtres passifs non intégrables tels que les filtres à cavités, à guides d'ondes, céramiques et les filtres SAW (**S**urface **A**coustic **W**ave) sont très largement utilisés. Ces filtres offrent de très bonnes performances, mais leurs dimensions encombrantes et leurs

pertes d'insertion représentent un inconvénient majeur. De plus, ils sont difficilement accordables en fréquence.

Dans ces conditions, les filtres actifs représentent une alternative intéressante vu leur facilité d'intégration et la possibilité d'être accordables en fréquence. Malheureusement, l'utilisation de ces filtres imposent la prise en compte des nouveaux paramètres tels que :

- la stabilité,
- les performances en bruit,
- la linéarité,
- la consommation,

III.2-Types des filtres RF

Dans les différentes applications des filtres RF, les filtres passe-bandes sont les plus utilisés car les filtres RF ont pour rôle de limiter la bande de fréquence à la bande utile, selon la théorie classique des filtres, de tels filtres peuvent être réalisés à l'aide des composants passifs tels que les inductances et les condensateurs connectés à des réseaux d'une certaine topologie.

III.2.1 -Les filtres céramiques

Un filtre céramique est un filtre électronique capable de résonner sur une fréquence fixe. Il est constitué d'une céramique spéciale, qui est souvent le titanate de zirconium. La fréquence de résonance du filtre, et sa bande passante, sont déterminées par la nature, la surface et l'épaisseur du matériau résonnant.

Un filtre céramique généralement comporte 3 broches : l'entrée (E), la masse (M) et la sortie (S). Sur certains modèles, l'entrée est repérée par un point rouge. Le signal d'entrée est injecté entre E et M, le signal de sortie est pris entre S et M. Il existe aussi des modèles à deux broches (comme le quartz) et filtres à éléments multiples, ce qui permet d'avoir une plus grande sélectivité.



Figure III.2 filtre céramique

III.2.2 -Filtre à onde acoustique (surface Acoustic Wave)

Les filtres à onde acoustique(SAW) dominent le marché des filtres RF aujourd'hui. Comme d'autres filtres acoustiques ils font usage du fait que la vitesse du son dans les matériaux solides typiques est un facteur de 10 000 inférieure à la vitesse d'une onde électromagnétique. Par conséquent, la longueur d'onde acoustique est seulement quelques-micromètres à la fréquence de 1 GHz. Cela permet de construire des résonateurs à ondes stationnaires acoustiques de très petite taille

Les signaux électriques sont convertis en onde mécanique par un cristal piézoélectrique. Cette onde est retardée lors de sa propagation dans le cristal, puis reconvertie en signal électrique. Les sorties retardées sont recombinaées pour constituer un filtre à réponse impulsionnelle finie.

III.2.3 -Filtre RF-MEMS

Les résonateurs piézoélectriques traditionnels (quartz) sont largement utilisés dans une gamme de fréquences allant jusqu'à 100 MHz, les filtres basés sur des résonateurs à diapason ont été largement utilisés pour le filtrage dans les systèmes téléphoniques filaires analogiques anciens à des fréquences autour de 100 kHz, les Dimensions géométriques définissent la fréquence de résonance et donc les processus MEMS sont en mesure de développer le concept de résonateurs mécaniques dans la gamme des GHz. Cela permet de faire extrêmement des petits filtres avec d'excellentes performances à faible coût, en général Il n'y a pas de distinction claire entre les filtres mécaniques et acoustiques à l'approche de cette gamme de fréquences. Le principe de filtres RF-MEMS sera examinée en détail dans le chapitre 3.

III.3 Vue d'ensemble sur la technologie MEMS dans les applications RF

Le secteur aujourd'hui le plus prometteur est certainement celui des radio-fréquence. Dans ce domaine, les filtres à ondes de surfaces ou SAW (Surface Acoustic Wave), fabriqués à partir de micro-technologies ne sont pas généralement associés au segment de marché microsystèmes proprement dit. Les volumes de production de cette fonction étant tellement importants, les chiffres du marché relatif aux filtres SAW éclipsaient presque totalement les autres applications. Cette technologie de filtrage passe-bande ne possède pas de réels et sérieux concurrents pour les fréquences comprises entre 500 MHz et 2 GHz.

Sur le marché RF, deux applications sont particulièrement attractives : fonctions passives et commutateurs.

III.3.1 Composants passifs

La conception et la fabrication de composants passifs intégrés selon des technologies microsystèmes sont amenées à prendre de l'ampleur dans les années futures, d'autant que ces dernières, loin de concurrencer les technologies LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic pour fabrication de circuits en multicouches) très attractives, se montrent au contraire totalement complémentaires, permettant ainsi la combinaison des avantages de chacune et la construction de modules intégrés toujours plus efficaces.

III.3.2 Commutateurs RF

Il existe actuellement un grand nombre de solutions pour la réalisation des fonctions de commutation électriques. La segmentation des diverses solutions technologiques est généralement basée sur la puissance et la fréquence du signal à commuter.

Selon les applications visées, un compromis est toujours nécessaire entre l'intégration de la technologie d'une part, les caractéristiques techniques (linéarité, isolation, pertes, etc.) et économiques (coût, volume, etc.) d'autre part.

La technologie principale et conventionnelle de commutation utilisée dans le monde de la microélectronique doit faire face à quelques difficultés techniques : impossibilité de garder un état constant (ouvert/fermé) sans consommation d'énergie, pertes d'insertion élevées,

isolement faible, linéarité ou intégrité du signal dégradées et pour finir une gamme de fréquences limitée.

Les commutateurs conventionnels utilisant la technologie de semi-conducteur (MOS, diodes PIN, commutateur AsGa) sont certes fiables et offrent des temps de commutation performants mais leur utilisation risque d'être en partie limitée pour les prochaines générations de téléphones portables du fait des contraintes énumérées auparavant (interférence de modulation, déformation de signal, pertes, etc.). Leur intégration est aussi parfois limitée : en tant que composants actifs, certains dispositifs passifs d'adaptation sont nécessaires, ce qui augmente singulièrement la taille finale du module.

La figure III.3 représente un schéma d'un module RF

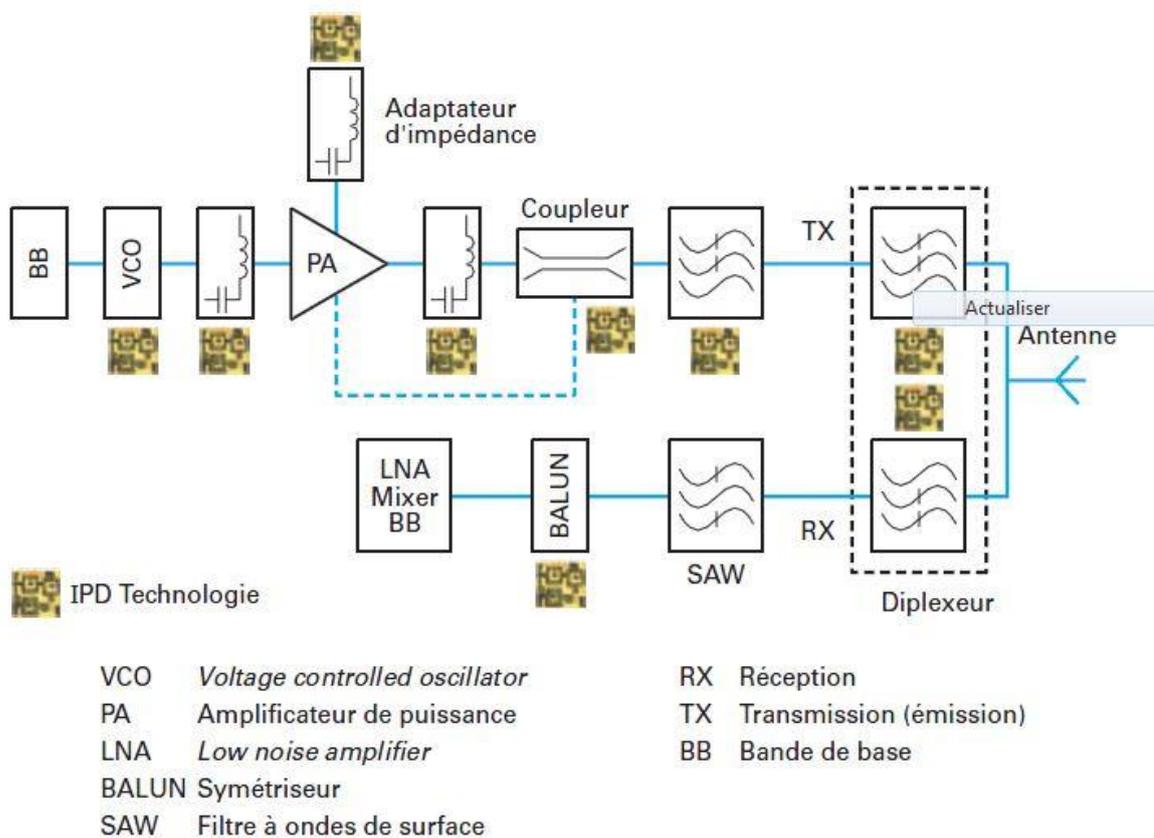


Figure III.3 Schéma d'un module RF

Il existe plusieurs types de filtre RF-MEMS on détaille dans ce chapitre le filtre RF ajustable

III.4 Filtre passe-bande ajustable a la technologie MEMS

Afin de réglé le filtre il faut choisir un élément passif variable on utilise dans notre cas une capacité variable.

La figure III.4 donne un vue sur le schéma de la capacité variable



Figure III.4 schéma de la capacité variable

Le filtre ajustable est montré dans la figure III.5

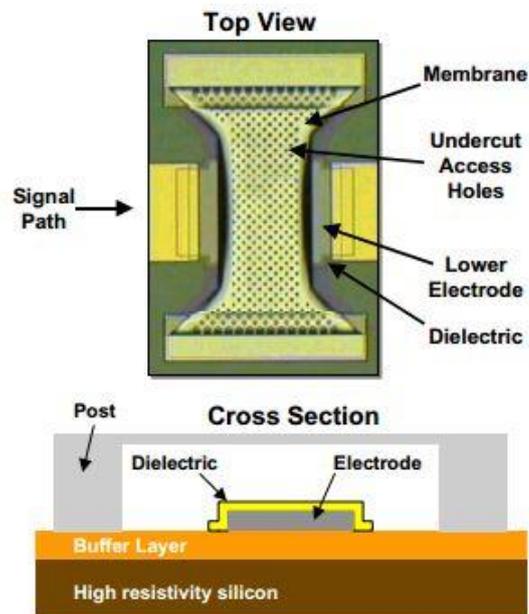


Figure III.5 filtre ajustable

La figure III.6 représente une photo d'une réalisation d'un filtre ajustable avec la technologie MEMS

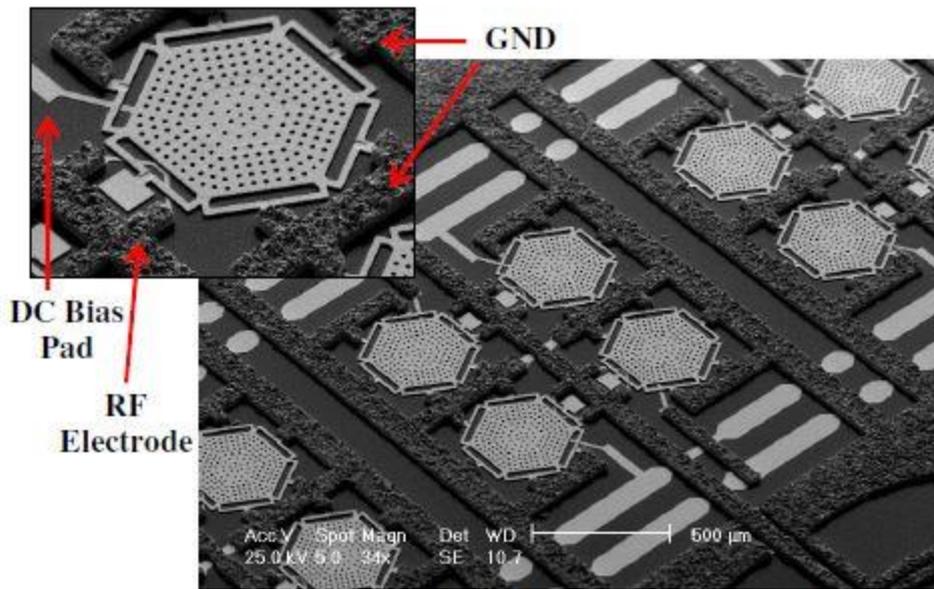


Figure III.6 image du filtre réalisé

L'empilement de filtre sur une seule plaque peut être fait afin de réaliser des récepteurs multivoies par exemple.

La figure III.7 illustre un seul filtre dans la plaque

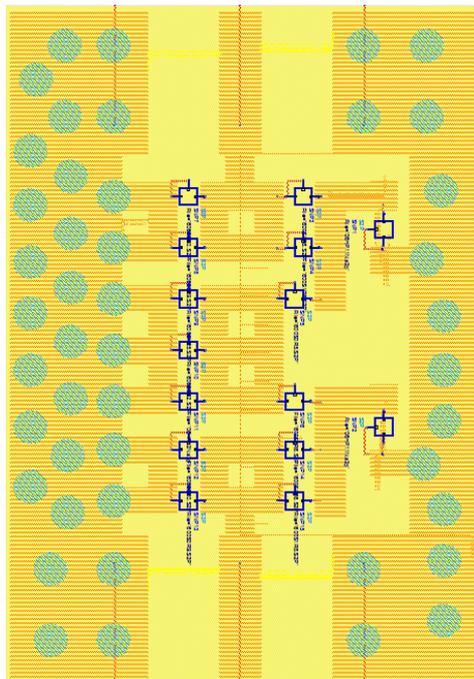


Figure III.7 filtre dans la plaque

la figure qui suit représente un empilement de filtre sur la même plaque

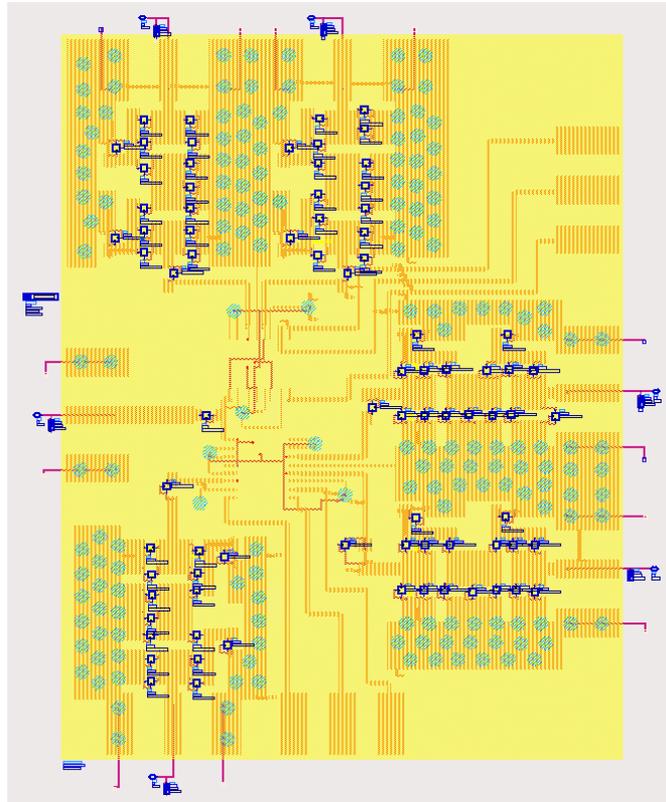


Figure III.8 Plusieurs filtres sur la même plaque

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons détaillés les types de filtres utilisés dans le domaine des radiofréquences, on a parlé ensuite de la technologie MEMS dans les applications RF

Un exemple de réalisation a été présenté à fin d'enrichir les connaissances des RF-MEMS

Conclusion Générale

Dans ce travail modeste on a introduit quelques notions de réalisation des filtres dans une technologie prometteuse qui est la technologie des microsystemes MEMS

Dans le premier chapitre on a parlé de la chaîne de réception avec ces différentes architectures

Ainsi que les blocs électroniques nécessaires pour la réalisation du système de réception

Le second chapitre une simple introduction aux domaines des microsystemes, dans un premier lieu on commence par l'explication des techniques de conception, décrire les méthodes de fabrications ainsi que les différents domaines d'applications.

Dans le troisième chapitre on parle essentiellement des filtres dans le domaine RF et on présente un simple exemple de réalisation d'un module de réception multivoies comme réalisé dans le projet de fin d'étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] I. BURCIU, Architecture de récepteurs radiofréquences dédiées au traitement bande simultanée, Thèse doctorat-Institut National des Sciences Appliquées de Lyon-2010
- [2] A. KARA OMAR, Développement d'une Architecture de Communication Sans Fil pour les Réseaux de Capteurs dans le Domaine Aérospatial, thèse Doctorat - Université de Toulouse-2011.
- [3] M.ISBERG B.LINDQUIST and P.W.DENT, A new approach to eliminate the DC offset in a TDMA direct conversion receiver, The IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, Mai 1993.
- [4] Sylvain PAINEAU et Philippe ANDREUCCI, Microsystèmes : applications et mise en œuvre, dossier techniques d'ingénieurs, Février 2005
- [5] R.AIGNER, MEMS in RF Filter Applications: Thin-film Bulk Acoustic Wave Technology, Infineon Technologies, Munich, Germany
- [6] JAMES BRANK, JAMIE YAO, MIKE EBERLY, ANDREW MALCZEWSKI, KARL VARIAN, CHARLES GOLDSMITH, RF MEMS-Based Tunable Filters, Raytheon Systems Company, May 2001