

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electronique



**Mémoire de Fin d'Etude
de MASTER ACADEMIQUE**
domaine : Sciences et technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : Microélectronique

Présenté par

**Oubraham Sofiane
Brachemi Ali**

Thème

***Identification de microstructure des pièges dans les
dispositifs MOS par la spectroscopie paramagnétique
de spin***

LIEU DE STAGE : Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA)
[Division Microélectronique]

Promoteur :
Mr. Rachid ZIRMI

Encadreur :
Mr. Hakim TAHI

Mémoire soutenu publiquement le /09/2018 devant le jury composé de :

Remerciements

Au terme de la rédaction de ce mémoire, c'est un devoir agréable d'exprimée en quelques lignes les reconnaissances qu'on doit a tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail.

Tout d'abord, on tient à remercier Mr ZIRMI Rachid notre promoteur pour nous avoir suivi, conseillé et guidé dans ce travail de fin d'études, ainsi que notre Co-Promoteur Mr TAHI Hakim attaché de recherche au CDTA, pour son orientation et l'intérêt qu'il a porté a notre recherche et en remercié aussi tous les personnelles du « CDTA » pour leur contribution.

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire : A
mes très chers parents ; A ma
sœur et mon frère ; A mon
binôme ;
A mes amis

Sofiane

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma chère mère

Je te remercie pour le soutien et l'amour que tu m'as porté depuis mon enfance et j'espère que ta
bénédiction m'accompagnera toujours

Mon cher père

Qui a été toujours à mes côtés durant toutes les années d'Études, qui a veillé à me donner l'aide, à
m'encourager et me soutenir, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir

C'est à vous deux que je dois cette réussite et je suis fier de vous l'offrir

À mes chères sœurs : **Sonia, feriel** et **lamia** je vous souhaite de bonheur et de la réussite dans vos
études et votre vie.

Mon beau-frère **Nacer** qui a été toujours là pour me soutenir merci infiniment, puisse dieu vous garder,
éclairer votre route et vous aider à réaliser votre tour vos vœux les plus chers.

Mes grands-mères « azouzou » Ghenima et Kheloudja et mon grand-père Mohammed puisse dieu leur
prêter longue vie et beaucoup de santé.

Je tiens enfin à exprimer ma reconnaissance et mon remerciement à mon binôme Sofiane et pour toute la
promotion de master 2 Micro-électronique ainsi à tous mes
amis « es »

Ali

Listes des figures

Listes des figures

Figure (I.1) : Graphique original de G.Moore sur le nombre de transistors intégrés pour une même fonction au cours du temps.....	5
Figure.(I.2) : Illustration de la loi de Moore, l'évolution actuelle de nombre de transistors intégrés sur la même puce.....	5
Figure (I.3) : évolution de la puissance dissipée au sein des microprocesseurs au cours de temps.....	6
Figure (I.4): évolution de la fréquence d'horloge des microprocesseurs au cours du temps.....	6
Figure (I.5) : structure d'un transistor MOSFET	8
Figure (I.6) : Effet de champ dans un transistor MOS	9
Figure (I-7) : Principe de fonctionnement du transistor MOSFET	10
Figure (I.8) : Diagramme d'énergie d'une structure MOS pour un semi-conducteur de type en condition de bandes plates.....	11
Figure (I.9) : Régime d'accumulation	12
Figure (I.10) : Régime de déplétion	13
Figure (I.11): Régime d'inversion	14
Figure (I.12) : Allure typique de la courbe courant de drain vs tension de grille d'un transistor MOS	16
Figure(I.13) : Motif de base de la silice	18
Figure (I.14): diagramme de bandes d'énergie de system si/sio2	18
Figure (I.15) : Schéma de diagramme des centres E' chargé positivement	
Un trou piégé par une lacune et oxygène	20

Listes des figures

Figure (I.16) : Les types de charges de l'oxyde et leur localisation.....	22
Figure (I.17): représentation de quelques défauts à l'interface Si-Sio2	24
Figure (I-18) : Diagramme de bandes du semi-conducteur faisant apparaître des pièges au niveau d'énergie	25
Figure (I-19) : illustration des différents mécanismes de piégeage	25
Figure (I-20) : classement des défauts dans l'isolant des structure MOS en fonction de leurs localisation (a) et de leurs réponse électrique (b)	26
Figure (I-21) : Représentation Schématique de la densité d'états d'interface introduits pa les Liaisons pendantes et distordues.	27
Figure (II-1) : représentation schématique d'un spin	30
Figure (II-2) : représentation des états d'un spin.....	31
Figure (II-3) : orientation des spins dans un champ magnétique.....	31
Figure (II-4) : Mouvement de l'électron	32
Figure (II-5) : moment magnétique d'un électron libre	34
Figure (II-6) : Orientations d'énergie minimales et maximales de par rapport au champ magnétique B0.....	34
Figure (II-7):Induction des énergies d'état de rotation en fonction du champ magnétique B0.....	35
Figure (II-8) : principe de fonctionnement de l'EPR	39
Figure (II-9) : illustration schématique du modèle shockley read hall pour la recombinaison.....	42
Figure (II-10) : phénomène des SDR	43
Figure (II-11) : phénomène schématique SDT	44
Figure (II-12) : montage expérimental utilisé en pompage de charges	46
Figure (II-13) : Situations énergétiques à l'équilibre (NMOS) (a) inversion forte et (b) cumulation.....	46

Listes des figures

Figure (III-1) : schéma synoptique du produit proposé.....	51
Figure (III-2) : (a) Bobines d’Helmholtz ; (b) champ magnétique généré par les deux paires de bobines.....	52
Figure (III-3) : schéma synoptique de la chaine de mesure du champ magnétique.....	53
Figure (III-4): le diagramme du programme de régulation du champ magnétique.....	54
Figure (III-5) : modulation du champ magnétique (générateurs basse fréquence et amplificateur audio).....	54
Figure (III-6) : la longueur électrique du câble en fonction de la fréquence.....	56
Figure (III-7). Schéma de l’oscillateur RLC.....	56
Figure (III-8) :a) : résonateur réalisé b) : valeurs obtenus	58
Figure (III-9) : a)test de circuit résonant ; b) résultat de réflexion S11.....	59
Figure (III-10) : chaine d’acquisition de signal EDMR.....	59
Figure (III-11) : diagramme de l’amplificateur à détection synchrone	61
Figure (III-12) : diagramme du programme de l’amplificateur à détection synchrone implémenté sous LabVIEW.....	62
Figure (III-13) : diagramme de programme de contrôle du spectromètre développé.....	63
Figure (III-14) : Interface du programme de contrôle de spectromètre	64
Figure (III-15) : schéma d’un pont en H	65
Figure (III-16) : schéma descriptif de IR2110	67
Figure (III-17) : un pont en H commandé par IR2110.....	68
Figure (III-18) : les sens de circulation de courant dans le pont en H.....	69
Figure (III-19) : a) transistor de puissance IRF840, b) structure microscopique	70
Figure (III-20) : Schéma illustratif d’un VDMOSFET.....	70
Figure(III-21) : circuit électrique de simulation.....	71

Listes des figures

Figure (III-22) : Les composant et les pistes circuit imprimé.....	72
Figure (III-23) : Le circuit imprimé de la réalisation coté composant.....	72
Figure (III-24) : le Circuit imprimé pour la réalisation.....	73
Figure (III-25) : Implantation des composant sur la maquette	74
Figure(III-26) : L’interface graphique de programme LabVIEW.....	76
Figure (III-27) : a) les différentes signaux a l’entrée b) la transformée de Fourier de signal précédent.....	77
Figure (III-28) : Le signal EDMR final.....	77
Figure (III-29) : la courbe cumulative de champ magnétique en fonction de temps en valeurs absolues.....	78

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau (III-1) : Caractéristiques des deux paires de bobine d’Helmholtz, l’indice (m) pour la bobine de modulation et (s) pour la bobine de génération du champ statique	52
Tableaux (III-2) : les Combinaisons permise de pont H.....	66

Liste des abréviations

CMOS : complementary metal Oxid semiconctor

CDTA : centre de développement des technologies avancées

EDMR :Electrically Detected Magnetic resonance

MOS :metal Oxid semiconctor

MOSFET :metal Oxid semiconctor Field Effect Transistor

NMOS : Transistor à effet de champ MOS à canal N

RPE : resonance paramagnétique électronique

SDR : Spin-Dependent Recombination

SDCP : Spin-Dependent charge pumping

SDT : Spin-Dependent tunneling

SRH Shockley-Read-Hall

VMOSFET : Vertical Double diffused metal Oxid semiconctor Field Effect Transistor

Introduction général

En microélectronique, la silice ou dioxyde de silicium « SiO_2 » est utilisé pour la conception de différentes sortes de films dont le rôle est de passiver « rendre inactif ou inerte » ou s'isoler « empêcher le transfert de charge ». Ces films sont utilisés à tous les niveaux de la conception des circuits intégrés ; isolation « substrat, caisson, zone active, implantation de champ », transistor « canal, grille isolée, source et drain », interconnexions « protection du transistor contact, métallisation et passivation final ». En tant qu'oxyde de grille du transistor MOS, le film de SiO_2 ainsi que l'interface qu'il forme avec le silicium jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des dispositifs. En effet, la commande de l'ouverture et de la fermeture de canal se fait par application d'un champ électrique à travers cet oxyde, tandis que la mobilité des porteurs dans le canal, ainsi que le bruit du dispositif sont directement fonction de la qualité structurale de Si- SiO_2 . Il est donc particulièrement important de contrôler à la fois l'épaisseur de la couche sa qualité structurale et la qualité de l'interface Si- SiO_2 .

L'efficacité d'un transistor MOSFET dépend de la qualité de l'oxyde de grille « SiO_2 » et son interface avec le substrat « Si/ SiO_2 », cette qualité justement se dégrade lorsque le transistor est soumis à des contraintes électriques, l'augmentation du champ électrique à l'intérieur du dispositif, due à la réduction de l'épaisseur de l'oxyde, conduit à l'échauffement des porteurs et favorisent leurs multiplication et leurs injections dans l'oxyde. Il en résulte alors, la création des différents types de défauts « pièges » qui causent par la suite la dégradation globale des paramètres déterminant les performances du transistor. On doit alors étudier la microstructure de ces défauts « pièges ».

Pour la caractérisation des défauts il y a plusieurs méthodes spectroscopiques, telle que la méthode dite EDMR (la résonance magnétique détectée électriquement). Cette dernière est basée sur la mesure du courant dépendant du spin. Elle englobe les techniques suivantes Spin-Dependent Recombination (SDR), Spin-Dependent charge pumping (SDCP) et Spin-Dependent tunneling (SDT). Ces techniques permettent la caractérisation automatique du composant durant son fonctionnement sans la modification des paramètres électriques contrairement aux techniques électriques.

Ce mémoire a pour but d'apporter une contribution dans le domaine de la résonance paramagnétique pour l'identification de microstructure des pièges dans le dispositif MOS.

Introduction générale

Nous avons ainsi partagé notre mémoire en quatre chapitres. Nous avons initialisé le première chapitre avec une brève présentation du transistor MOSFET et son principe et régime de fonctionnement au de l'évolution de la technologie CMOS ; ensuite les défauts à l'interface Si-SiO₂. De plus nous nous concentrons sur les propriétés de l'empilement MOS plus précisément l'oxyde de grille SiO₂ et les défauts liés aux procédés de fabrication, en particulier les défauts ponctuels actifs situés à l'interface Si/SiO₂.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la technique de résonance paramagnétique électronique, on commence par une introduction au magnétisme de la matière ensuite on introduit les techniques des spectroscopies EDMR « Electrically Detected Magnetic Resonance » et EPR « electron paramagnetic resonance » utilisées pour l'identification de la microstructure.

Le troisième chapitre en a divisé en deux partie dont la première partie est consacré sur le spectromètre EDMR est différents matériels utilisé en sein du centre de développement technologique avancées CDTA. En second partie nous avons défini le dispositif utilisé dans ce travail qui est un transistor commercial VDMOSFET IRF840.

Nous conclurons notre mémoire par une conclusion globale sur notre étude

Pour le troisième et le dernier chapitre, nous l'avons divisé en deux parties dont la première partie est consacré au spectromètre EDMR et aux différentes matériels utilisés au sein du centre de développement technologique avancées CDTA. Dans la seconde partie nous avons défini le dispositif utilisé dans ce travail qui est le transistor commercial VDMOSFET IRF840

SOMMAIRE

Chapitre I : Généralité sur les transistors MOS à effet champs et les défauts d'interface Si/SiO₂

Introduction	3
I. Généralités sur les transistors à effet de champs (MOSFET)	4
I.1 Evolution de la technologie CMOS	4
I.2 Description des transistors à effet de champs MOSFET	7
I.2.1 présentation historique de transistor MOSFET	7
I.2.2 Architecture et structure du transistor MOSFET.....	7
I.2.3. Principe de fonctionnement	9
I.2.4 Les régimes de fonctionnement du MOSFET	11
I.2.4.1 : régime d'accumulation.....	12
I.2.4.2 régime de déplétion.....	12
I.2.4.3 régime d'inversion.....	13
I.2.5 Etude des caractéristiques du transistor et équations de base.....	15
I.2.5.1 Tension de seuil : Définition	15
I.2.5.2 Temps de commutation	15
I.2.5.3 Pente sous le seuil.....	16
II.1 les défauts d'interfaces Si/SiO ₂	17
II-1-interface Si/SiO ₂	17
II.1.1 création de SiO ₂	17

II.1.2 structure de SiO ₂	17
II.1.3 Propriétés électriques du SiO ₂	18
Diagramme de bandes	18
II.2 nature des défauts dans l'oxyde et l'interface Si/SiO ₂	19
II.2.1 Défauts de volume	19
II.2.2 Défauts dans l'oxyde	20
II.2.3 Défauts intrinsèques	20
II.2.4 Défauts extrinsèques.....	21
II.2.5 Classification des défaut.....	21
II.2.6 Défauts d'interface	23
III Comportement électrique des défauts	24
III.1 Notion de défaut électriquement actif.....	24
III.2 notion de piège.....	24
III.3 Les liaisons pendantes	26
III.4 Les liaisons distordues.....	27
Conclusion	28

Chapitre II : Technique de résonance paramagnétique électronique

Tables des matières

Introduction	29
I-magnétisme de la matière	30
I-1 introduction au magnétisme.....	30

I-1-1 notion de spin	30
I-2 moment magnétique.....	32
I-2-1 moment orbital	32
I 2-2 moments de spin.....	33
I-3 effet Zeeman	35
I-4 notion de résonance.....	36
I-4-1 phénomène de résonance.....	36
I-4-2 condition de résonance	37
II-présentation et discussion des techniques expérimentales.....	37
II-1 résonance paramagnétique électronique (RPE)	37
II-1-1 introduction a la résonance paramagnétique électronique.....	37
II-1-2 principe fondamentale de la résonance paramagnétique électronique.....	38
II-2 résonance magnétique électriquement détectée EDMR	40
II-2-1 théorie de résonance magnétique électriquement détectée EDMR	40
II-2-1-1 recombinaisons dépendent de spin SDR.....	41
II-2-1-1-1 présentation et principe de SDR	41
II-2-1-2 tunnel dépendant du spin SDT	43
II-2-1-3 pompage de charge dépendant spin SDCP.....	45
II-2-1-3-1 description de la méthode SDCP	45
II-2-1-3-2 principe de fonctionnement	46
Conclusion.....	48

Chapitre III : Description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

Introduction.....	49
I-spectrometer EDMR (Electrically Detected Magnetic Resonance).....	49
I-1 Aperçu sur le spectromètre EDMR réalisé.....	49
I-2 Application du spectromètre d'ESMR réalisé.....	50
I-3 Description du spectromètre réalisé.....	50
I-3-1 Bobines d'Helmholtz.....	51
I-3-2 Régulation du champ magnétique est génération d'une rampe.....	53
I-3-3 Modulation du champ magnétique (Générateur basse fréquence et amplificateur audio).....	54
I-3-4 Circuit résonant.....	55
I-3-4-1 Test de circuit résonant.....	58
I-3-5 Chaîne de conditionnement de signal EDMR.....	59
I-3-6 Amplificateur à détection synchrone (lock in ampliflier).....	60
I-3-7 Logiciel de contrôle du spectromètre EDMR développé.....	63
II- Motivation de ce travail.....	65
II-1 introduction.....	65
II-2 Principe de pont H.....	65
II-2-1 Le MOSFET driver IR2110.....	67
II-2-2 Fonctionnement de pont H commandé par IR2110.....	68

II-3 Réalisation pratique du pont H.....	69
II-3-1 Le transistor MOSFET de puissance.....	69
II-3-2 Structure de base du transistor VDMOSFET.....	70
II-3-3 étape de réalisation pratique de la carte.....	71
II-3-3-1 Simulation du circuit avant sa réalisation	71
II-3-3-2 Création et réalisation du circuit imprimé.....	72
II-3-3-3 Développement de la maquette.....	73
II-3-3-4 Implémentation des composants sur la carte.....	74
II-3-3-5 Liste des composants utilisés et leurs nomenclatures.....	75
II-3 Tests de pont H.....	76
II-3-1 interface de LABVIEW.....	76
II-3-2 interprétation des résultats.....	78
Conclusion.....	79

Introduction :

Le transistor MOSFET (Métal Oxide Semi-conductor Fiele Effect) est l'un des composant omniprésent dans tous les domaines de l'activité humaine, il représente l'élément fondamental des circuit intègres a très large échelle d'intégration VLSI (Very Large Scale Integrated) et ULSI (Ultra Large Scale Integrated) a technologie MOS qui domine maintenant le domaine de l'industrie semi-conducteurs, le choix d'un tel camposant est lie a la possibilité de réduction des dimensions de transistor MOS et sa simplicité de fabrication qui nécessite moins d'étape technologiques comparer la technologie bipolaire.

Un tel transistor est caractérisé par une zone de conduction qui sépare deux réservoirs source et drain nommé canal, son contrôle se fait par une électrode de commande dite la grille qui est isolé de ce canal par un oxyde de grille ,on utilise la silice ou dioxyde de silicium (SiO_2) pour la conception de différentes sortes de films dont le rôle est de passiver (rendre inactif ou inerte) ou d'isoler (empêcher le transfert de charges) à tous les niveaux de la conception des circuits intégrés : isolation (substrat, caisson, zone active, implantation de champ), transistor (canal, grille isolée, source et drain), interconnexions (protection du transistor, contact, métallisation, passivation finale).

Toutefois, la réduction de plus en plus des dimensions de transistor MOSFET lors de l'utilisation entraine la dégradation le vieillissement de l'oxyde par conséquence l'augmentation des champs électriques dans la structure MOS et la concentration des défauts à l'interface Si-Sio2, ce défaut induit à des phénomènes parasites qui peuvent détériorer la propriété et les performances d'un dispositif

En tant qu'oxyde de grille du transistor MOS, le film de SiO_2 ainsi que l'interface qu'il forme avec le silicium sous-jacent, jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des dispositifs. En effet, la commande de l'ouverture et de la fermeture du canal se fait par application d'un champ électrique à travers cet oxyde tandis que la mobilité des porteurs dans le canal, ainsi que le bruit du dispositif sont directement fonction de la qualité structurale de l'interface Si-SiO₂. Il est donc particulièrement important de contrôler à la fois l'épaisseur de la couche, sa qualité structurale et la qualité de l'interface Si-SiO₂.

I. Généralités sur les transistors à effet de champs (MOSFET):

I.1 Evolution de la technologie CMOS:

Le développement de la microélectronique n'aurait pas pu être aussi spectaculaire sans la maîtrise de l'élément de base des circuits intégrés : le silicium(Si) qui a permis à ce domaine d'atteindre un immense succès ces dernières années. Aujourd'hui nous pouvons ainsi considérer dans la conception des circuits intégrés en technologie CMOS (complément métal Oxid semiconctor) que le transistor MOS est l'élément de base des évolutions majeures, on peut le considérer à la fois acteur et vecteur de cette évolution car il est à l'origine de la conception des circuits intégrés, il est présent en forte densité dans les circuits intégrés tels que les microprocesseurs a permis à mener la technologie CMOS au rang incontesté de technologie dominante dans l'industrie mondiale des semi-conducteurs.

En 1995, Gordon Moore, l'un des co-fondateurs d'Intel a prédit que le nombre de transistors par unité de surface doublerait tous les ans (Fig.I.1), Concrètement, les progrès technologiques ne permettront de multiplier la densité d'intégration par deux que tous les dix-huit mois. Cette évolution appelée (Loi de Moore) aujourd'hui la ligne directrice des objectifs, soit plus généralement ; la feuille de route connue sous le terme (roadmap) des différentes industries de la microélectronique, bien que depuis une vingtaine d'années nous pouvons considérer que le nombre de transistors intégrés sur une même puce ne double que tous les vingt-six mois (Fig.I.2). La diminution de la longueur de grille est en termes de conception bénéfique pour deux raisons :

- ❖ En termes de coût, elle permet la réduction de la surface d'intégration, à puissance égale à 1 (Fig.I.3)
- ❖ En termes de performances elle permet la croissance de la fréquence de fonctionnement des circuits qui est inversement proportionnelle à la longueur de grille (Fig.I.4).

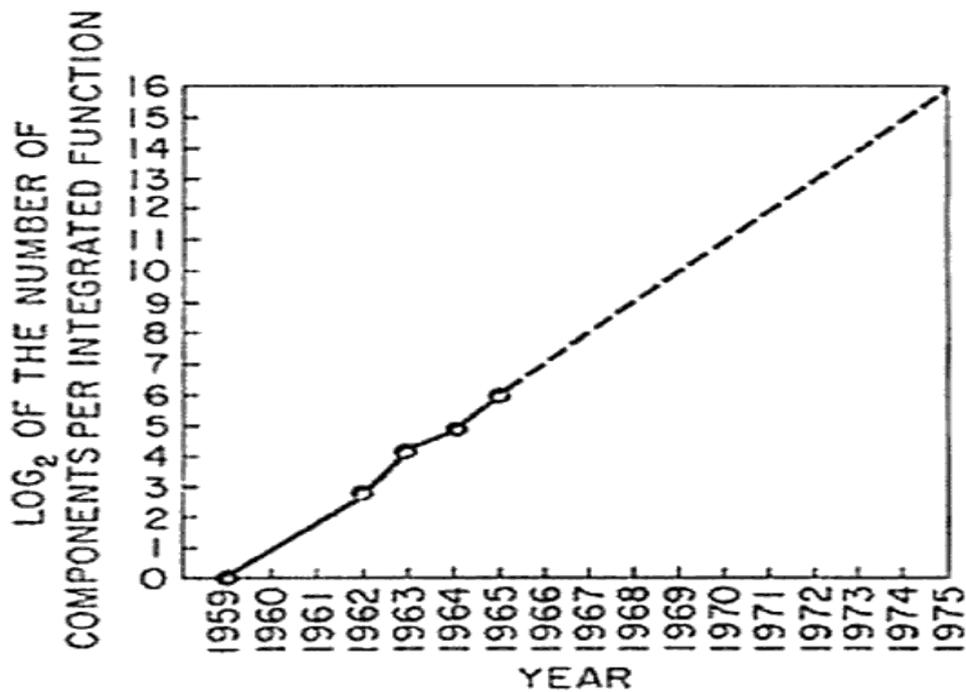


Fig. 2 Number of components per integrated function for minimum cost per component extrapolated vs time.

Figure I.1 : Graphique original de G.Moore sur le nombre de transistors intégrés pour une même fonction au cours du temps

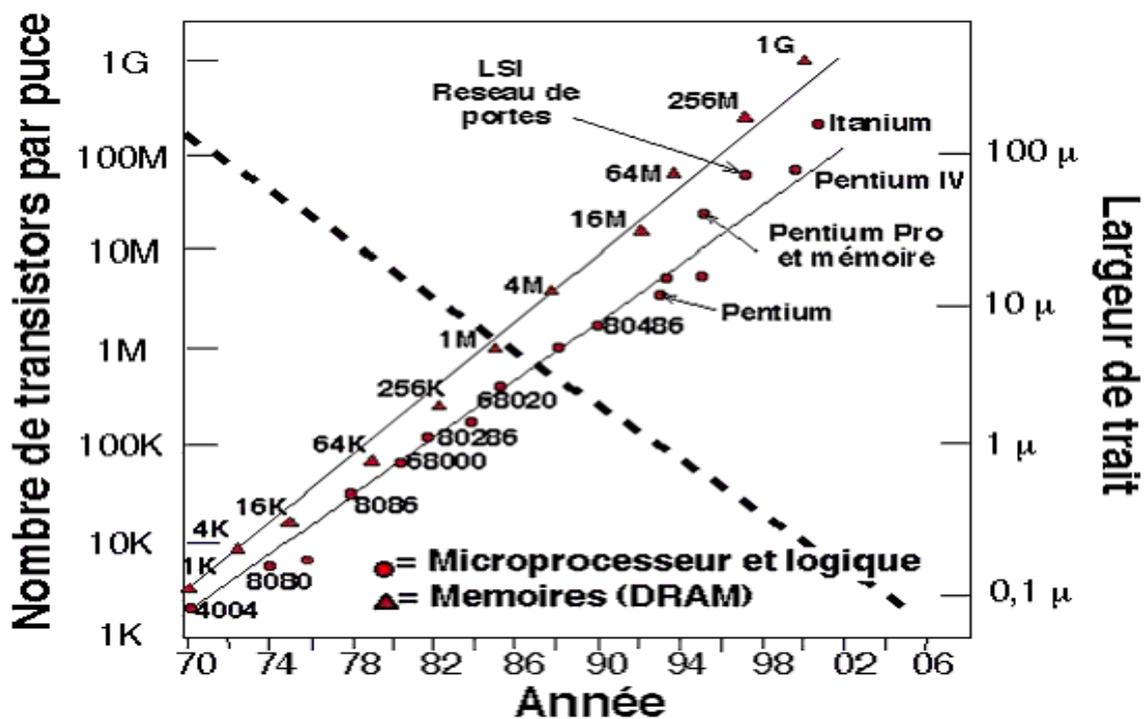


Figure.I.2 : Illustration de la loi de Moore, l'évolution actuelle de nombre de transistors intégrés sur la même puce.

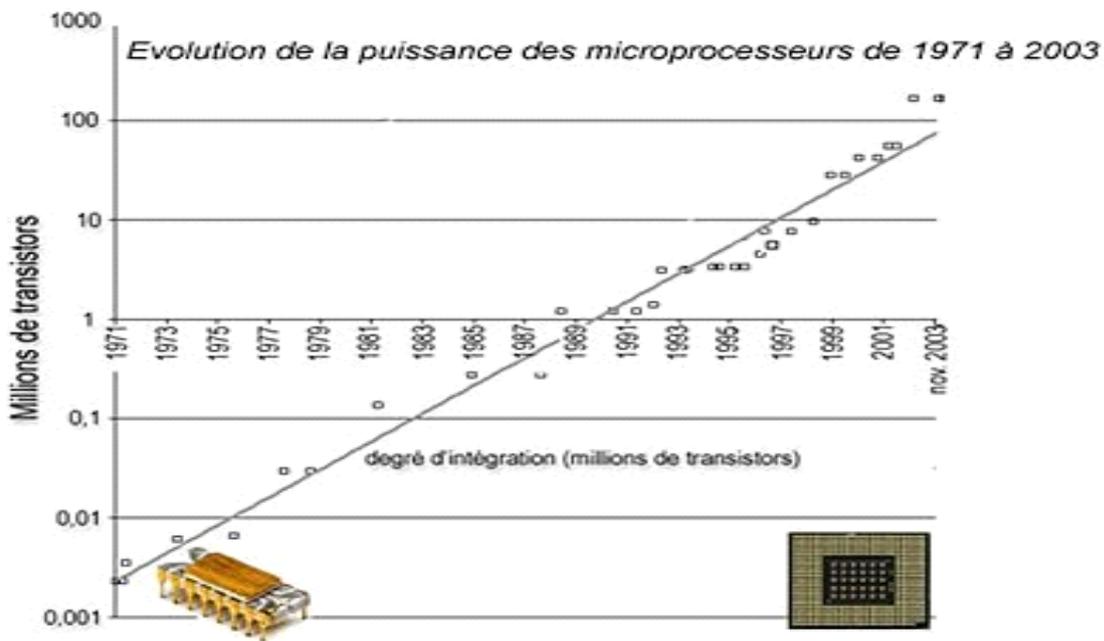


Figure I.3: évolution de la puissance dissipée au sein des microprocesseurs au cours de temps

Microprocesseurs grand marché: fréquence d'horloge (1)

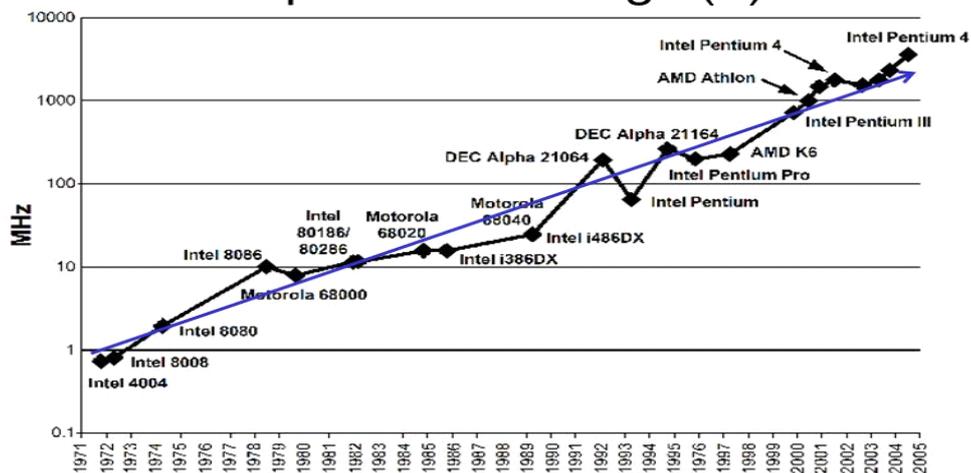


Figure I.4 : évolution de la fréquence d'horloge des microprocesseurs au cours du temps

I.2 Description des transistors à effet de champs MOSFET :

I.2.1 présentation historique de transistor MOSFET:

Le transistor MOSFET dérive de La structure MOS (métal oxid semiconductor) qui est composé de trois couches : un semi-conducteur (silicium cristallin dopé), un isolant (oxyde de silicium SiO₂) obtenu par oxydation thermique du substrat en silicium et un conducteur (grille métallique), (5) Ce composant a été proposé en 1930 par JULIUS EDGAR LILLIENFELD et OSKAR HEIL en suite a été étudié par Wiliam Beradford Shockley et roger pearson en 1940 aux bell labs.

En 1960 Martin Josef R. Ligenza et W.G. Spitzer ont réussi à réaliser le premier dispositif basé sur le système Si/Sio₂ par oxydation thermique et Martin M. Atalla a proposé la structure MOSFET basé sur ce système et fut déclaré par D. Kahng et M. atalla en 1960. [1]

Le principe du transistor MOS à effet de champs a été connus depuis 1930, mais sa réalisation n'était possible jusqu'aux années 1959, lorsque Robert Noyce a présenter le premier transistor planaire et deux ans plus tard le premier circuit intègres a vus le jour après la progression technologique, le nom de ce dispositif est tiré de son principe de fonctionnement puisque le courant qui le traverse est contrôlé par un champ électrique généré par une tension. [2]

I.2.2 Architecture et structure du transistor MOSFET :

Le MOSFET est traditionnellement représenté comme un interrupteur par les dessinateurs de circuit logiques. En effet, l'électrode appelée <<grille>>, permet de contrôler le courant traversant un canal de conduction établi entre l'électrode de source et l'électrode de drain Ainsi la grille agit comme électrode de commutation de l'état bloquée à l'état passant et vice versa

La technologie CMOS est basée sur l'utilisation de deux types de transistors complémentaires le transistor nMOSFET dont les porteurs chargés sont des électrons et le transistor pMOSFET dont les porteurs sont des trous. [3]

Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors mos à effet champs et les défauts d'interface si/sio2

- ❖ Le transistor nMOS : dans ce cas le substrat semi-conducteur est de type(P), le canal d'inversion constitue d'électrons, il est alors dopé (P) contrairement aux zones source et drain dopées (N), le passage de courant est gouverné par les porteurs majoritaires qui sont les électrons ;
- ❖ Le transistor pMOS le substrat dans ce cas est de type (N) ; le canal d'inversion est constitué de trous qui assurent la conduction ; il est alors dopé (N) contrairement au source et drain dopées (P).

La structure conventionnelle du transistor à effet champs est la combinaison de quatre électrodes nommées :

- Source (S) ;
- Drain(D) ;
- Grille (G) ;
- Bulk(B).

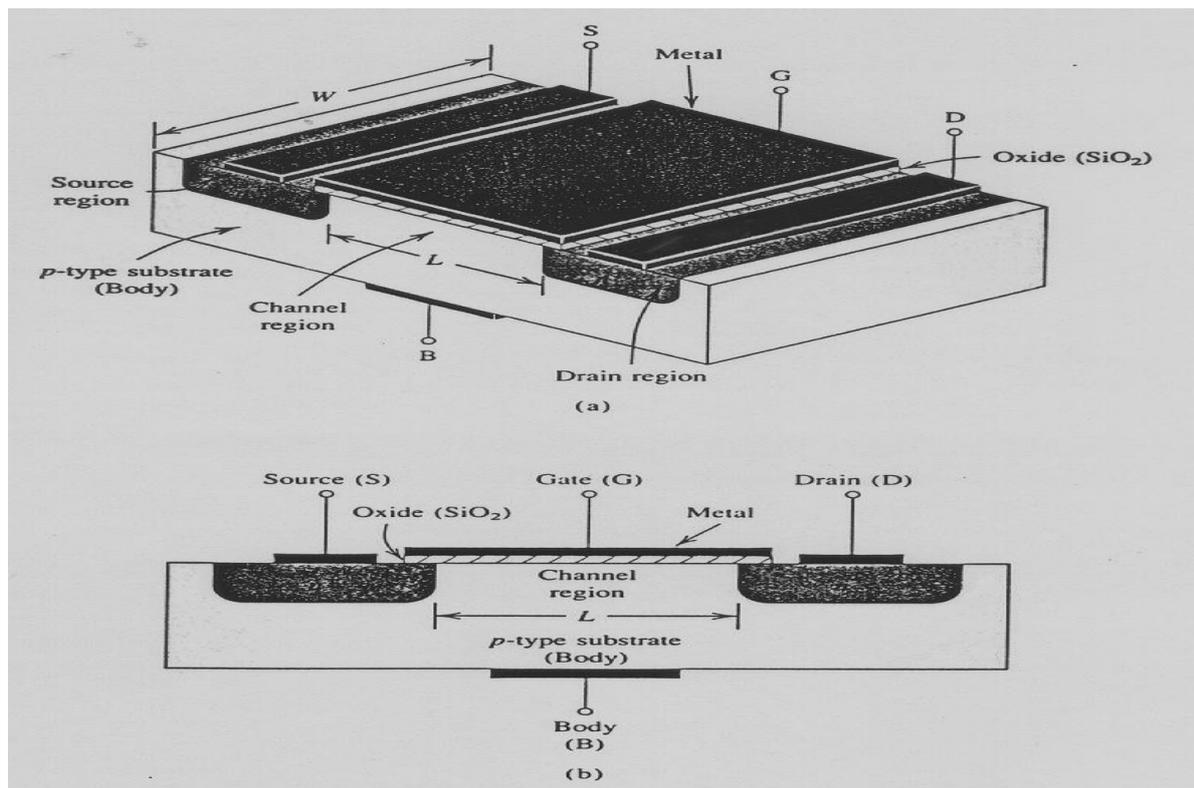


Figure (I.5) : structure d'un transistor MOSFET

I.2.3. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du transistor MOS est basé sur l'effet de champ électrique qui joue le rôle d'un interrupteur en passant ou en bloquant le courant dans le canal [4].

Cela permet deux types de fonctionnement : soit en amplification pour les applications de type analogique, soit en tout ou rien pour les applications logiques.

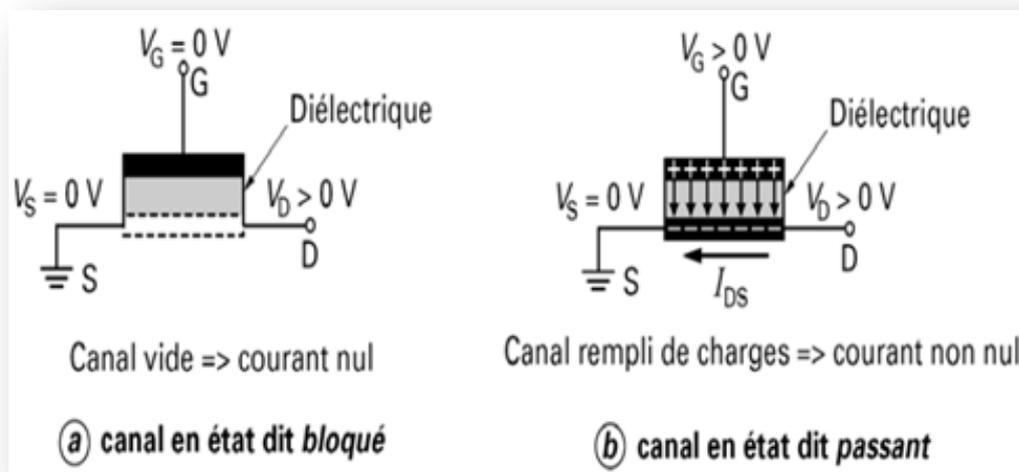


Figure (I.6) : Effet de champ dans un transistor MOS

Le transistor MOSFET à enrichissement, qui est représenté sur la figure (1.5) se caractérise par le fait que la grille, par l'effet de champ électrique, contrôle à travers l'oxyde de grille, la densité de porteurs dans le canal du dispositif et ainsi l'intensité du courant. le canal est relié de part et d'autre a deux régions fortement dopées entre lesquelles est appliquée une tension donnant lieu à la circulation du courant [5]

Le passage des électrons d'un réservoir à un autre nécessite un champ électrique latérale qui va les entrainer de la source vers le drain, le drain sera polarisé ;le champ verticale de la grille peut aussi modifier la concentration des porteurs libres à l'interface oxyde /silicium ; dans le cas d'un nMOS, il peut accumuler des trous, porteurs majoritaire du volume dopé (p) on parle alors d'accumulation, dans le cas contraire le champ peut repousser les trous de la surface c'est la désertion (ou déplétion) ; si ce champs est suffisamment fort ,les électrons

Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors mos à effet champs et les défauts d'interface si/sio2

libres minoritaires des deux réservoirs (source/drain) sont attirés vers l'interface on parle d'inversion (si le nombre d'électrons est suffisant le silicium dopé (P) au départ devient (N) en surface par la suite).

Dans le cas idéal (voir figure (I-7)) : lorsque la tension appliquée sur la grille est nulle ($V_G=0V$) le champ électrique est nul ; il n'y a aucun porteur dans le canal ; le transistor est bloqué, par contre si la polarisation de la grille V_G est égale à celle du drain V_D un champ électrique est créé, les porteurs affluent dans le canal peuvent alors transités librement d'un réservoir à un autre, un courant de drain non nul (I_D) est généré ; le transistor est alors passant.

Le passage de l'état bloqué à l'état passant se fait lorsqu'un nombre suffisant de porteurs est présent dans le canal ($V_G=V_T$) . [2 ;6].

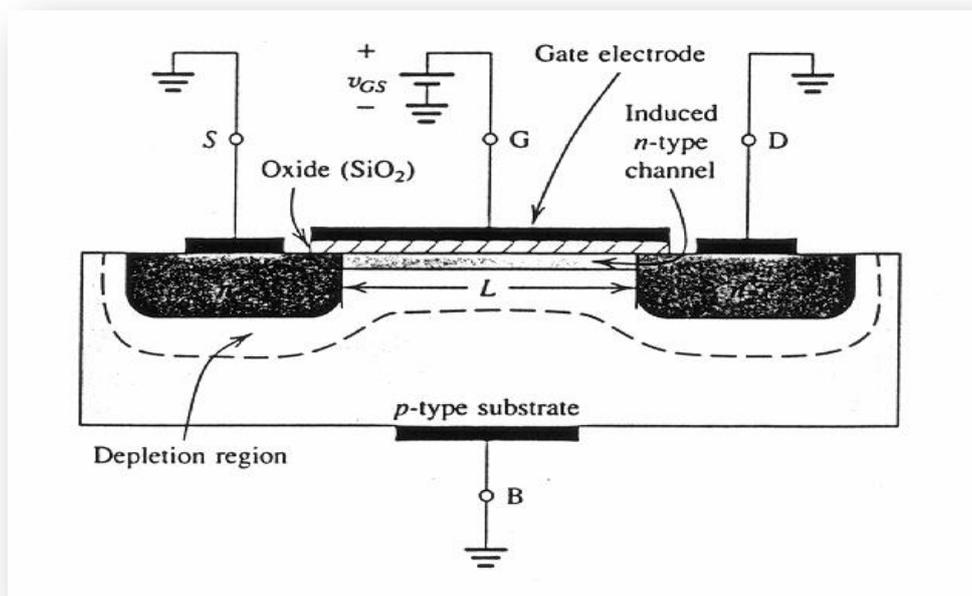


Figure (I-7) : Principe de fonctionnement du transistor MOSFET

I.2.4 Les régimes de fonctionnement du MOSFET :

Il existe trois régime :

- ✓ Régime d'accumulation,
- ✓ Régime de déplétion
- ✓ Régime d'inversion

L'application d'une tension sur le courant de grille a une incidence directe sur la nature des porteurs se trouvant à la surface du semi-conducteur sous l'influence d'un champ électrique. Pour une meilleure compréhension des différents régimes de fonctionnement du MOSFET, il est important de revoir le diagramme de bande de la structure (Métal-Oxyde-semiconductor) en condition de bandes plates (travail de sortie du métal (Φ_m)) est égale à celui du semiconduteur Φ_s de même pour les énergies de Fermi ($E_{FM} = E_{FS} = E_F$) [7].

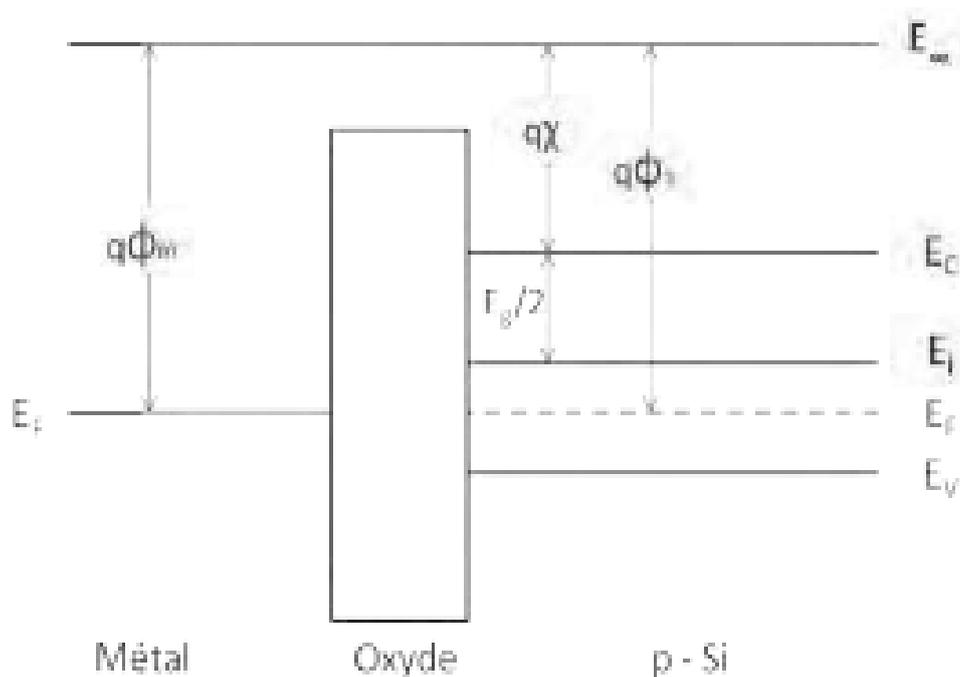


Figure (I.8) : Diagramme d'énergie d'une structure MOS pour un semiconduteur de type en condition de bandes plates. [7].

Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors mos à effet champs et les défauts d'interface si/sio2

I.2.4.1 : régime d'accumulation : $\psi_s < 0$ soit $V_G < V_{FB}$

Pour une tension $V_{GS} < 0V$, on assiste à une courbure des bandes d'énergie vers le haut à l'interface oxyde/semiconducteur. Les trous, considérés comme porteurs majoritaires sont attirés à la surface du semi-conducteur. d'où le nom de régime d'accumulation. le canal de conduction n'étant pas formé le transistor est bloqué (figure I.9) [6].

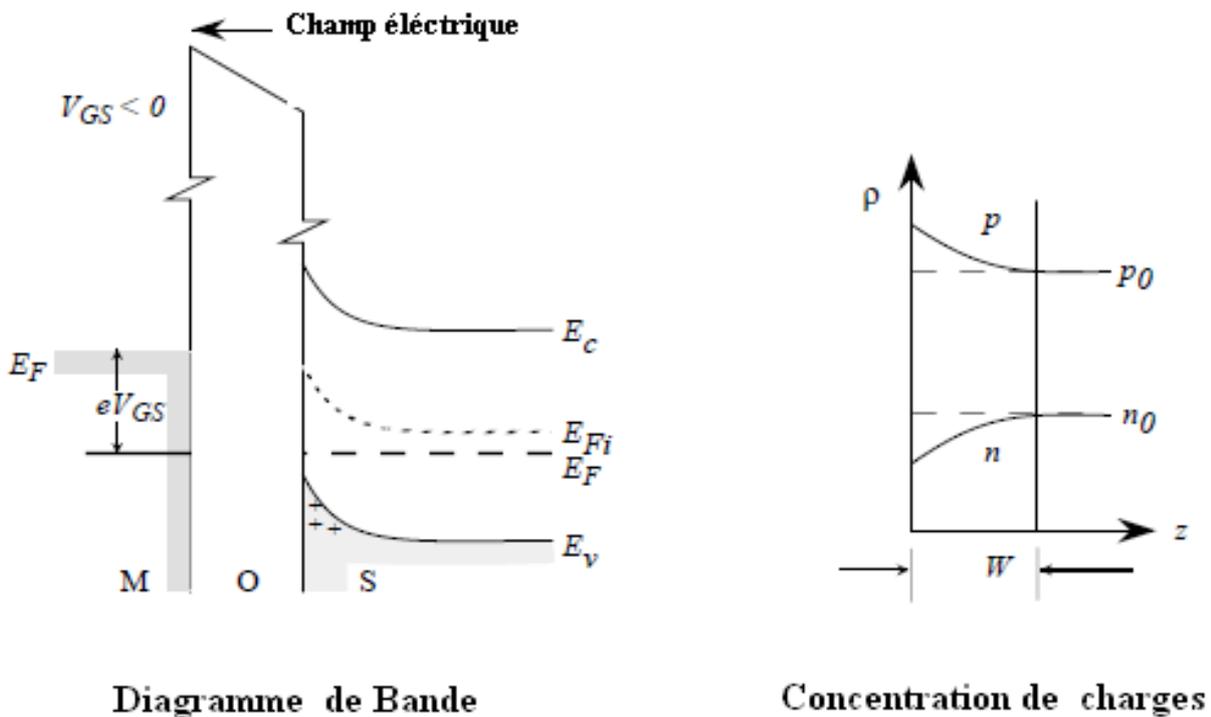


Figure (I.9) :Le régime d'accumulation [6].

I.2.4.2 régime de déplétion : $0 < \psi_s < \Phi_f$, $V_G > V_{FB}$:

Le potentiel électrique ψ_s est positif et la concentration de trous diminue. La concentration en électron augmente mais toujours moins importante que celle de trou [8]. Cette zone résulte au déplacement des trous à travers le semi-conducteur c'est-à-dire les porteurs majoritaires sont repoussés de la surface du semi-conducteur et une zone désertée en porteurs se crée, le transistor ne conduit pas [9].

$$n < p < N_a \text{ (PMOS) ou } p < n < N_d \text{ (NMOS)}$$

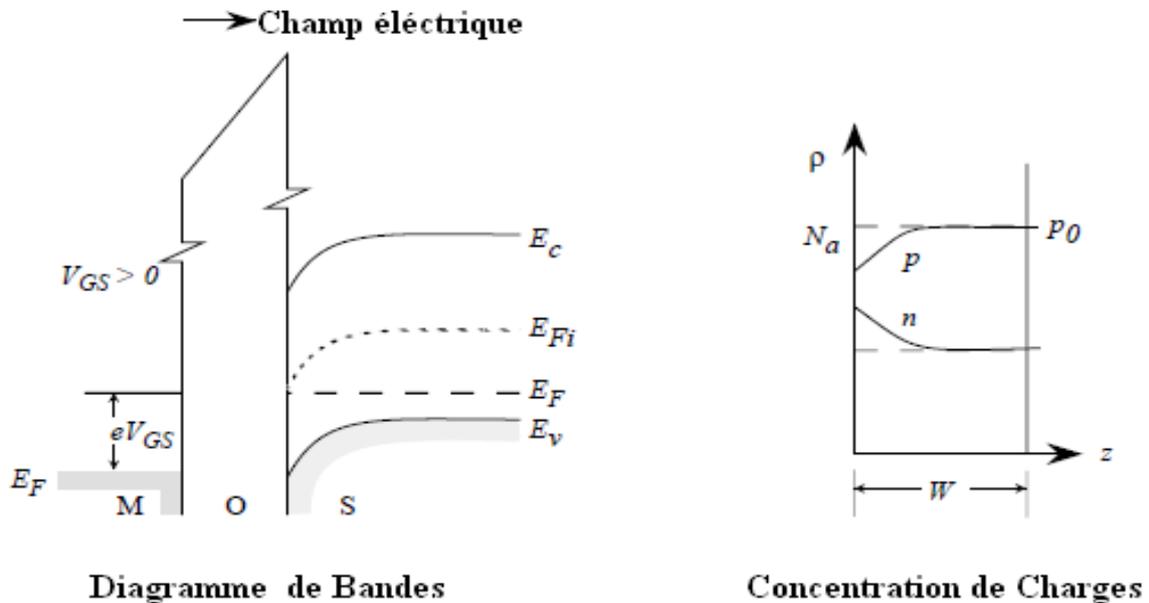


Figure (I.10) : Le régime de déplétion

I.2.4.3 régime d'inversion : $-\Phi_f < \psi_s < 2\Phi_f$

- ❖ Faible ($\Phi_f < \Psi_s < 2\Phi_f$ et $V_{mg} < V_g < V_{th}$)

La concentration en électrons libre est supérieure à celle de trous à l'interface SiO2/Si et la couche d'inversion commence à se former. Et $n > p$ (NMOS) ou (PMOS). [8].

- ❖ Forte ($\Psi_s > 2\Phi_f$ et $V_g > V_{th}$)

La concentration de porteurs minoritaires est grande devant celle des porteurs majoritaires $n \gg p$ (NMOS).

$\Psi_s = 2\Phi_f$ représente la condition qui définit la limite entre l'inversion faible et forte. En inversion forte on distingue plusieurs régimes de fonctionnement : le régime ohmique (linéaire) quand $V_d \ll V_g - V_{th}$, le régime de saturation quand $V_d \gg V_g - V_{th}$.

- ✓ Si $V_d \ll V_{ds} = V_g - V_{th}$ la tension de drain est faible, le courant de drain varie proportionnellement à la tension drain-source, le transistor fonctionne en régime linéaire.

Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors mos à effet champs et les défauts d'interface si/sio2

- ✓ Si $d < V_{ds}$ la tension drain-source augmente, la variation de la tension de polarisation de la capacité MOS le long de canal devient important, la densité d'électron dans la couche d'inversion diminue, la conductance de canal diminue le courant de drain présente alors une variation sous-linéaire avec la tension drain-source et amorce la structuration, pour une valeur $V_d = V_{ds}$, la capacité MOS n'est plus en inversion coté drain la conductivité du canal est fortement réduite au voisinage de drain, c'est le régime de pincement, la tension drain-source correspondante est appelée tension de saturation. $V_d > V_{ds}$ quand la tension source-drain augmente au de-là de la tension de saturation, la région voisine de drain n'est plus en inversion, le point de pincement, dont le potentiel reste constant, se déplace vers la source [8]. (32.a)

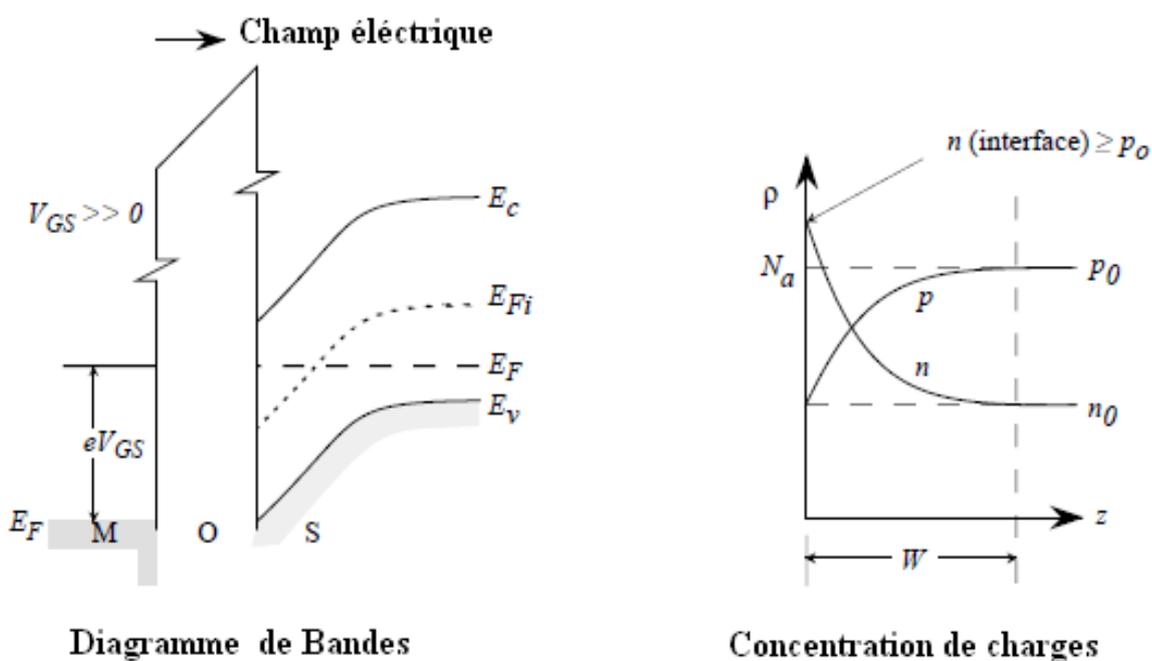


Figure (I.11): Le régime d'inversion

I.2.5 Etude des caractéristiques du transistor et équations de base

Dans ce paragraphe, nous allons définir quelques paramètres caractéristiques du MOSFET.

I.2.5.1 Tension de seuil : Définition :

On définit la tension de seuil V_{th} de la structure comme la tension de grille pour laquelle la densité de charges d'inversion devient égale à la densité de charge de déplétion, le potentiel de surface correspondant est alors $\Phi_S = 2\Phi_F$. Dans ce cas les charges d'inversion sont des porteurs libres et la tension V_{th} correspond à l'apparition d'une couche conductrice dans le semi-conducteur au voisinage de l'interface. Ce paramètre est fondamental, car il va gouverner la mise en conduction du transistor. Dans le cas d'un NMOS lorsque la tension de grille V_g est suffisamment négative cette polarisation conduit à un appel de trous en surface, on est alors en régime d'accumulation et le transistor est bloqué. En augmentant progressivement la tension V_g , les trous vont faire place aux électrons créant une zone de déplétion (charge surfacique d'atomes accepteurs ionisés) avec une densité surfacique $Q_{dép}$.

La tension qui a initié l'inversion de porteurs dans le canal est la tension de seuil.

$$V_{th} = V_{fb} + 2\Phi_F + \frac{Q_{dép}}{C_{ox}}$$

Où : V_{fb} est la tension de bande plate

I.2.5.2 Temps de commutation :

Plusieurs paramètres caractérisent les transistors MOS. Le temps de commutation intrinsèque est défini par la relation

$$\tau = \frac{C_{ox} V_{DD}}{I_{ON}}$$

Il désigne le temps nécessaire à un transistor pour passer de l'état bloqué à un état passant avec :

$$C_{ox} = C_{ox1} W L$$

Où C_{ox1} est la capacité de la grille et V_{DD} est la tension d'alimentation définie précédemment.

Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors mos à effet champs et les défauts d'interface si/sio2

Il est évident qu'il faut réduire au maximum ce temps de commutation et nous pouvons noter que la diminution de τ passe notamment par une augmentation du courant I_{ON} (I_d) débité par le transistor, ainsi qu'une optimisation du C_{ox} .

I.2.5.3 Pente sous le seuil

La pente sous le seuil est un paramètre caractéristique du régime d'inversion faible. Elle est définie comme :

$$S = \frac{\partial V_g}{\partial \log I_d} = \frac{KT}{q} \ln(10) \left(1 - \frac{1}{C_{ox}} \frac{\partial Q_d}{\partial \phi_s}\right)$$

Elle s'exprime en Volts/décade et correspond à la variation de la barrière de potentiel à l'entrée du canal en fonction de la tension de grille ou comme étant la variation de la polarisation de grille nécessaire pour une variation d'une décade du courant de drain. Il s'agit d'un paramètre capital pour l'optimisation du rapport entre courant de fuite et courant de saturation, car à tension de seuil égale, une diminution de la valeur de la pente sous le seuil permet une diminution du courant I_{off} sans dégradation du courant de saturation.

La limite théorique de la pente sous le seuil est fixée par le phénomène de diffusion et vaut $\ln(10) \cdot kT/q = 60$ mV/décade à 300 K. [10]

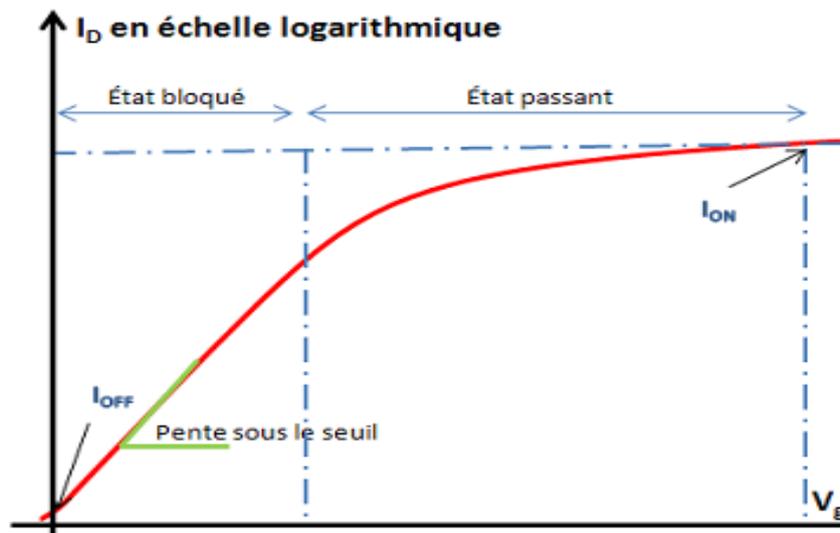


Figure (I.12) : Allure typique de la courbe courant de drain vs tension de grille d'un transistor MOS [10].

II. les défauts d'interfaces Si/SiO₂ :

II-1-interface Si/SiO₂ :

II.1.1 création de SiO₂ :

L'oxyde de grille a été obtenu par oxydation thermique du silicium. C'est la technique la plus couramment utilisée depuis les années 50, car c'est elle qui donne les oxydes de meilleure qualité, même si d'autres procédés tels que les dépôts chimiques en phase vapeur < CVD > permettent aujourd'hui d'obtenir des oxydes de qualités équivalentes.

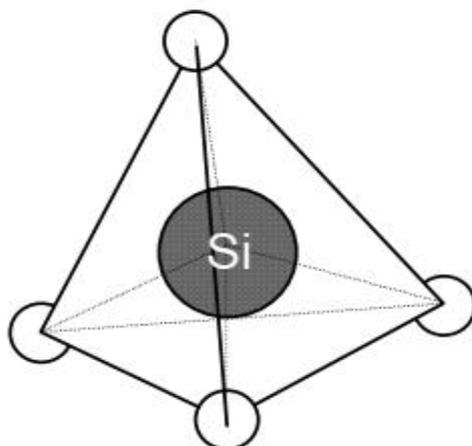
L'oxydation thermique du silicium est effectuée à hautes températures (800 à 1200 °C) à l'intérieur d'un four parcouru par un courant gazeux oxydant (O₂ ou H₂O). Afin de limiter certains effets liés à la redistribution des impuretés de dopage, on cherche à diminuer ces températures. La croissance de l'oxyde se fait en consommant du silicium. Selon la nature de ses dernières deux réactions chimiques se manifestent :

- Oxydation sèche : $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$
- Oxydation humide : $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$
- La vitesse de la réaction chimique dépend de la température, de la pression, de la nature de l'oxyde et de l'orientation cristallographique des dopants dans le substrat de silicium [11]

II.1.2 structure de SiO₂ :

La silice est la forme naturelle de dioxyde de silicium SiO₂ qui entre dans la composition de nombreux minéraux. La silice existe à l'état libre sous différentes formes allotropiques : (même composition chimique mais arrangement atomique différent) : cristalline (ordre cristallin à longue distance) , vitreuse (ordre à courte distance) et amorphe (absence d'ordre) .

L'unité structurale de base de la silice est un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène et chaque atome d'oxygène est lié à deux atomes de silicium. Comme dans la structure cristalline la nature amorphe du matériau est donnée par l'orientation aléatoire des liaisons. [12] .



Figure(I.13) : Motif de base de la silice [12]

II.1.3 Propriétés électriques du SiO₂

Diagramme de bandes

Le diagramme de bandes du système Si/SiO₂ est représenté sur la figure. La largeur de la bande interdite de l'oxyde est importante (environ 9 eV) ce qui lui confère le caractère d'un bon isolant. Les valeurs des hauteurs de barrière vues par les porteurs du silicium sont de l'ordre de 3,2 eV pour les électrons (côté bande de conduction) et 4,6 eV pour les trous (côté bande de valence). L'oxyde est donc assez bien protégé contre l'injection des porteurs, en particulier de celle des trous.

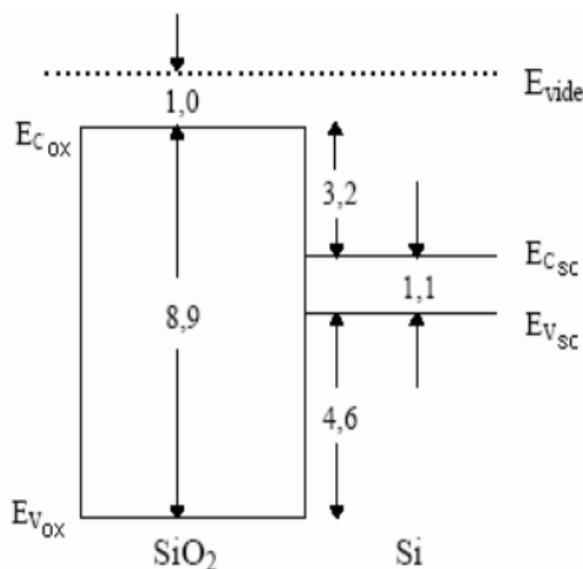


Figure (I.14): diagramme de bandes d'énergie de system si/sio2

Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors mos à effet champs et les défauts d'interface si/sio2

E_{vide} : énergie du vide, E_{Csc} : énergie du bas de la bande de conduction du semiconducteur.

E_{Vsc} : énergie du haut de la bande de valence du semiconducteur, E_{Cox} : énergie du bas de la bande de conduction de l'oxyde.

E_{Vox} : énergie du haut de la bande de valence de l'oxyde. [13]

II.2 nature des défauts dans l'oxyde et l'interface Si/SiO₂ :

Les défauts qui peuvent être mis en jeu soit à l'interface Si/SiO₂ ou dans l'oxyde d'un composant électronique résultent durant :

- ❖ Le traitement postérieur du composant (lors des étapes de fabrication : implantation, oxydation.) selon les conditions de réalisation.
- ❖ Le traitement antérieurs (qualité de la surface sur laquelle l'oxyde va croître)

II.2.1 Défauts de volume :

Les défauts qui prédominent dans le volume de l'oxyde pour SiO₂ sont les lacunes d'oxygène et les liaisons pendantes de Si (silicium trivalent). La maille élémentaire de SiO₂ est un tétraèdre occupé à ses sommets par les atomes d'oxygène, l'atome de silicium se situant au centre. La couche présente sur les dispositifs MOS n'est pas cristalline mais vitreuse et présente un ordre à faible distance. La lacune d'oxygène est donc une absence d'atome d'oxygène, la liaison covalente se faisant directement entre deux atomes de silicium. La liaison Si-Si est plus faible que la liaison Si-O et est donc susceptible d'être brisée plus rapidement, ce qui peut produire un défaut dit E'. Le défaut E' revient à une rupture de liaison Si-Si et apparaît donc en lieu et place d'une lacune d'oxygène. Un des deux atomes de silicium a cédé un électron et est donc chargé positivement (trou capturé), le second a un électron non apparié et constitue le centre E'. [14]

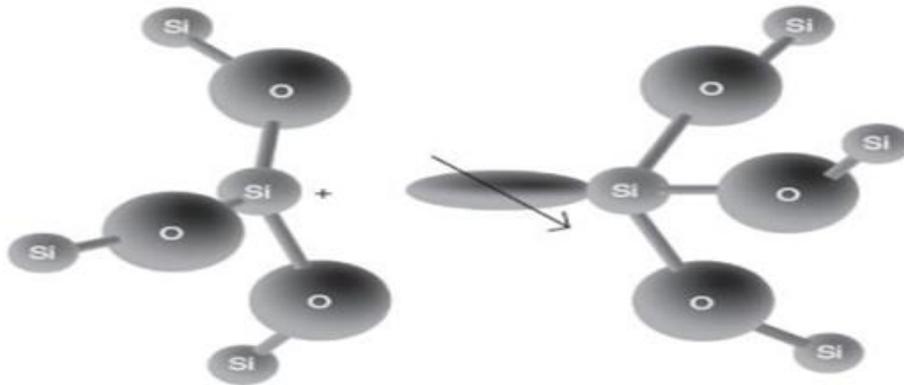


Figure (I.15) : Schéma de diagramme des centres E' chargé positivement.

Un trou piégé par une lacune et oxygène [14]

II.2.2 Les défauts dans l'oxyde :

Les défauts résultent des conditions de croissances de l'oxyde mais aussi le traitement qui subit le transistor ; antérieurs (qualité de surface sur laquelle l'oxyde va croître) et postérieurs (implantation, diffusion traitement thermiques contraintes mécanique ...) à la croissance de l'oxyde [7].

II.2.2.1 Défauts intrinsèques :

Ils sont liés à l'arrangement des atomes de silicium et d'oxygène entre eux : si la structure est telle que localement les distances et les angles θ entre les atomes varient, mais pas suffisamment pour qu'il y ait rupture de liaisons entre atomes, alors on parle de microhétérogénéités (réseau continu mais orienté de façon aléatoire). Sinon, peuvent apparaître des défauts ponctuels (imperfections qui perturbent la périodicité du réseau sur un ou deux sites atomiques), qui, combinés entre eux, conduisent à la formation de défauts complexes.

Ponctuels ou complexes, ces défauts sont dus à des interstitiels (substitution d'un atome du réseau par un autre) ou à des lacunes (d'oxygène ou de silicium) associés à des liaisons contractées, cassées ou pendantes [15]

II.2.2.2 Défauts extrinsèques

Ils sont liés à la présence dans l'oxyde d'atomes étrangers qui se combinent avec le réseau de nombreuses manières, selon la valeur de leur rayon atomique, selon qu'ils sont ionisés ou non ou selon les conditions thermodynamiques de leur introduction. Un atome de silicium peut, par exemple, être remplacé par un atome de type accepteur (groupe III) ou de type donneur (groupe V), tandis qu'un atome d'oxygène peut être remplacé par un autre anion. De façon analogue aux défauts intrinsèques, on parlera de défauts ponctuels ou complexes. Les impuretés peuvent pénétrer à l'intérieur de l'oxyde à différents moments du processus technologique :

- ❖ Durant l'oxydation thermique, si elles sont déjà présentes dans le substrat de silicium (cas des atomes dopants As, B, P...) ou si elles ont été introduites, volontairement ou non, dans le gaz oxydant (cas de l'eau et des composés chlorés) ;
- ❖ Durant la croissance de la silice, si elles sont présentes dans l'ambiance (cas des ions alcalins Ca, K, Na ...) ;
- ❖ Durant les étapes qui suivent la croissance ou la déposition de l'oxyde [métallisation, implantation ionique, traitements haute température (Ar, H₂, N₂ ...)]. **[15]**

II.2.5 Classification des défauts

On distingue quatre types de charges :

- ❖ La charge fixe
- ❖ La charge piégée
- ❖ La charge mobile ionique
- ❖ La charge des états d'interface

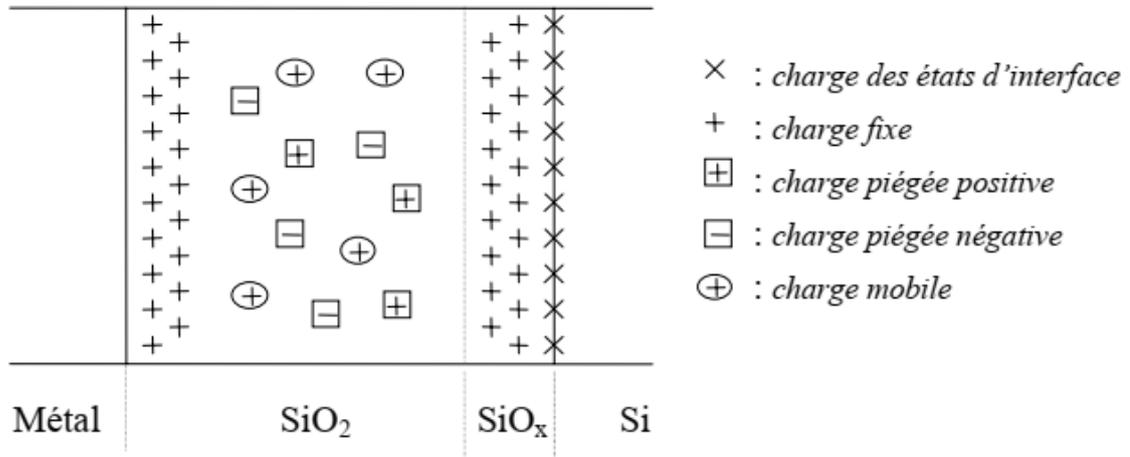


Figure (I.16) : Les types de charges de l'oxyde et leur localisation

II.2.5.1 La charge fixe dans l'oxyde :

C'est une charge positive localisée très près des interfaces Si-SiO₂ et grille-SiO₂ qui n'évolue pas, sauf si des conditions thermiques ou électriques particulières dégradent le dispositif (radiations ionisantes, contraintes électriques). Cette charge est attribuée à un excès de silicium figé à la fin du processus d'oxydation. La charge fixe d'un oxyde thermique humide est plus grande que celle d'un oxyde sec puisque dans le premier cas, la vitesse de réaction étant plus grande, la réaction d'oxydation à l'interface est plus incomplète.

La présence éventuelle d'une charge fixe à l'interface Si-SiO₂ est un fait important, puisqu'elle va induire à la surface du silicium une charge image négative qui modifie le potentiel de surface du semi-conducteur et donc les tensions de seuil et de bandes plates du dispositif.

II.2.5.2 La charge piégée dans l'oxyde

C'est une charge stockée par les pièges du volume de l'oxyde (interfaces non comprises). Elle peut être positive ou négative. Cette charge n'est pas permanente au même titre que la charge fixe, puisqu'un apport thermique ou un champ électrique appropriés peuvent favoriser sa diminution (dépiégeage des charges stockées).

II.2.5.3 La charge mobile ionique

C'est une charge due à la contamination de l'oxyde par des impuretés ioniques (métaux alcalins : K^+ , Li^+ , Na^+ ...). Ces impuretés, localisées à l'interface Si-SiO₂, peuvent migrer d'une interface à une autre sous l'effet d'un champ électrique ou de la température

II.2.5.4 La charge piégée des états d'interface

Elle est piégée par les défauts qui résultent de la discontinuité de réseau à l'interface Si-SiO₂. Ces défauts appelés états d'interface jouent un rôle primordial dans le fonctionnement du transistor MOS, car contrairement aux défauts de volume de l'oxyde, ils sont en communication électrique directe avec le semiconducteur. Le signe de cette charge dépend des conditions de polarisations appliquées au dispositif, qui font que selon sa nature (donneur

ou accepteur) et sa position par rapport au niveau de Fermi, un état d'interface est chargé négativement, positivement ou neutre. [15]

II.2.6 Défauts d'interface :

L'interface entre le diélectrique et le semi-conducteur est l'objet de nombreux défauts. La structure et les paramètres de maille des deux matériaux ne peuvent être identiques. Il en résulte que les liaisons sont contraintes, distordues voire pendantes. Dans le cas de SiO₂, ces liaisons pendantes sont appelées centres Pb et ont été mises en évidence par Electron Spin Résonance (ESR). Il en existe deux types : Pb₀ et Pb₁. Pb₀ est un atome de silicium trivalent lié à trois autres atomes de silicium dont la quatrième liaison est pendante vers l'oxyde noté $\bullet Si \equiv Si_3$. Pb₁ est un atome de silicium trivalent lié à deux atomes de silicium et un atome d'oxygène noté $\bullet Si \equiv Si_2O$. Ces défauts ont trois états de charge possible suivant la position du niveau de Fermi dans la bande interdite du semi-conducteur. Si E_F est proche de la bande de valence la charge est positive, s'il est proche de la bande de conduction la charge est négative. Si le niveau de Fermi est au centre de la bande interdite, la charge est nulle. Ce sont des défauts amphotères. Les défauts à l'interface peuvent également être des liaisons faibles Si-Si et Si-O ou encore des impuretés à l'interface. Les liaisons distordues constituent également

Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors mos à effet champs et les défauts d'interface si/sio2

des états d'interface. La répartition énergétique des états d'interface liés aux défauts se fait dans la bande interdite. Les énergies des états liés aux distorsions de liaisons se situent essentiellement aux extrémités de la bande tandis que les liaisons pendantes sont le siège de niveaux plus profonds [14]

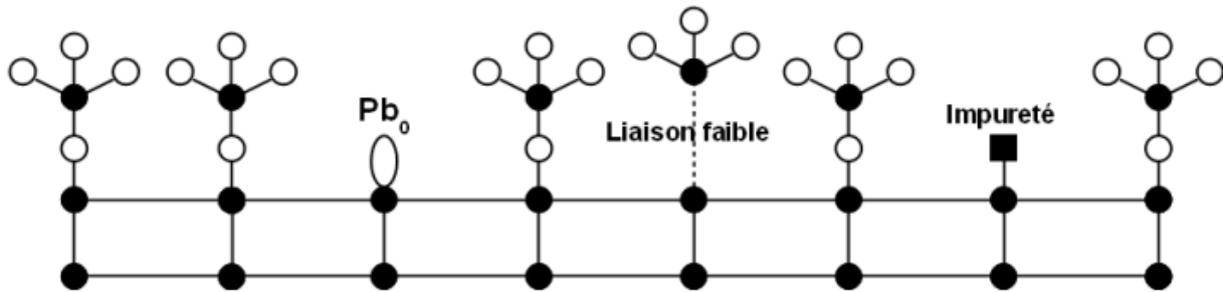


Figure (I.17): représentation de quelques défauts à l'interface Si-SiO2

III Comportement électrique des défauts :

III.1 Notion de défaut électriquement actif

Les ruptures dans la périodicité du SiO₂ donnent naissance à l'introduction de nouveaux niveaux d'énergie dans la bande interdite du SiO₂ notée E_T le défaut peut être peu profond si le porteur est faiblement lié aux défauts veut dire que ce niveau E_T est proche de la bande de conduction E_C pour un électron ; ou de la bande de valence E_v pour un trou ; dans le cas contraire le porteur est fortement lié au défaut et que le niveau E_T est loin de la bande de conduction E_C pour un électron et de la bande de valence E_v pour un trou .[16]

III.2 notion de piège :

Les défauts qui introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite de l'oxyde sont électriquement actifs lorsque le passage du niveau E_F au niveau d'énergie E_T provoque un changement de charge ,car ils sont capables de capturer des porteurs tout comme les puits de potentiel. Un défaut peut se comporter comme un lieu de piégeage s'il capte un porteur de la bande de valence ou de conduction et le réémet ensuite vers cette même bande, ce dernier est capable de stocker une charge positive ou négative au cours d'un certain temps deux classes sont distinguées selon le type de charge [17]

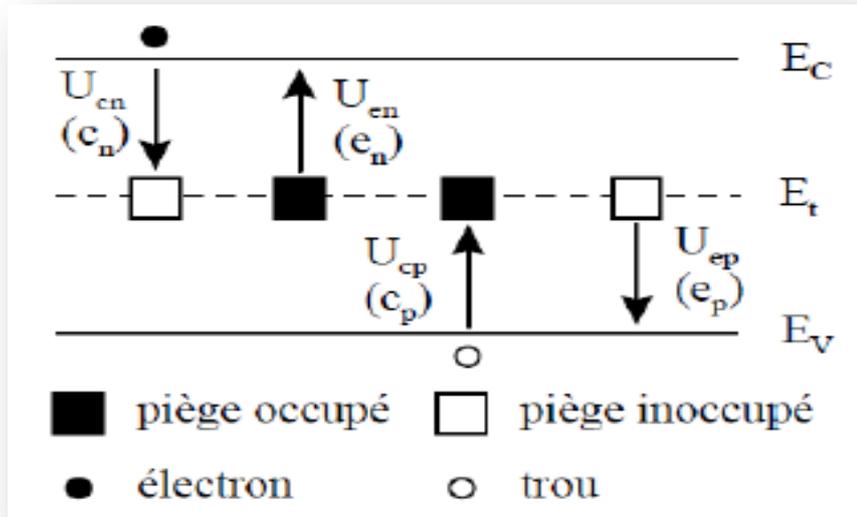


Figure (I-18) : Diagramme de bandes du semi-conducteur faisant apparaître des pièges au niveau d'énergie [17]

Chaque piège est caractérisé par un niveau d'énergie E_t dans la bande interdite et par deux sections de capture σ_n et σ_p , il peut capturer un électron de la bande de conduction (ou un trou de la bande de valence) et le réémet ensuite vers cette même bande, comme un lieu de recombinaison s'il peut échanger des porteurs avec les bandes de conduction et de valence ; les différents mécanismes de piégeage possibles sont illustrés (figure I.19)

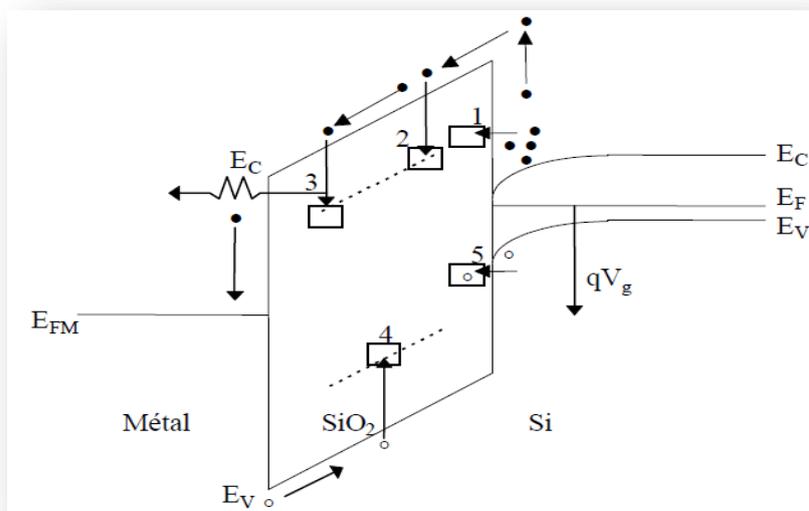


Figure (I-19) : illustration des différents mécanismes de piégeage [17]

Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors mos à effet champs et les défauts d'interface si/sio2

- 1 : Transition tunnel d'un électron depuis la bande de conduction du Si
- 2 : Capture non radiative d'un électron de la bande de conduction du SiO₂
- 3 : Capture radiative d'un électron de la bande de conduction du SiO₂
- 4 : Capture d'un trou de la bande de valence du SiO₂
- 5 : Transition tunnel d'un trou depuis la bande de valence du Si

II.3 Les liaisons pendantes :

Les liaisons pendantes, c'est-à-dire les liaisons covalentes non satisfaites, sont à priori les candidats les plus plausibles pour expliquer la présence de niveaux d'énergie accessibles par les porteurs dans la bande Interdite. Pour une meilleure compréhension et une plus grande clarté, nous avons représenté l'oxyde de silicium sous sa forme cristalline (figure I-20) alors qu'il se présente sous forme amorphe dans les transistors MOS.

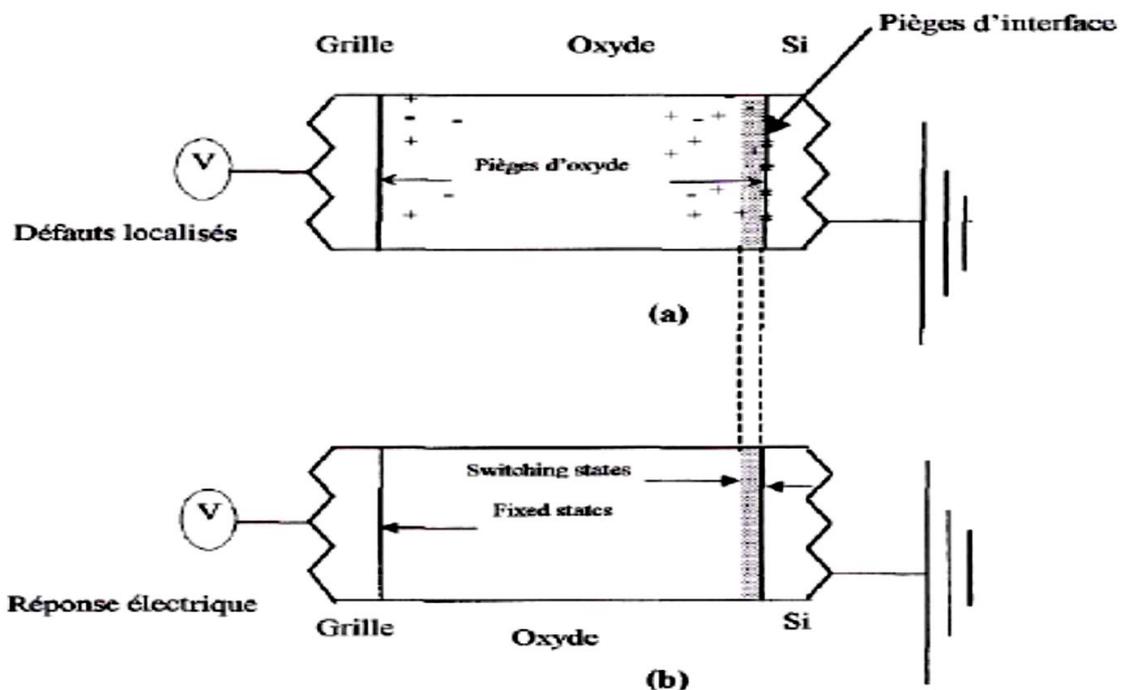


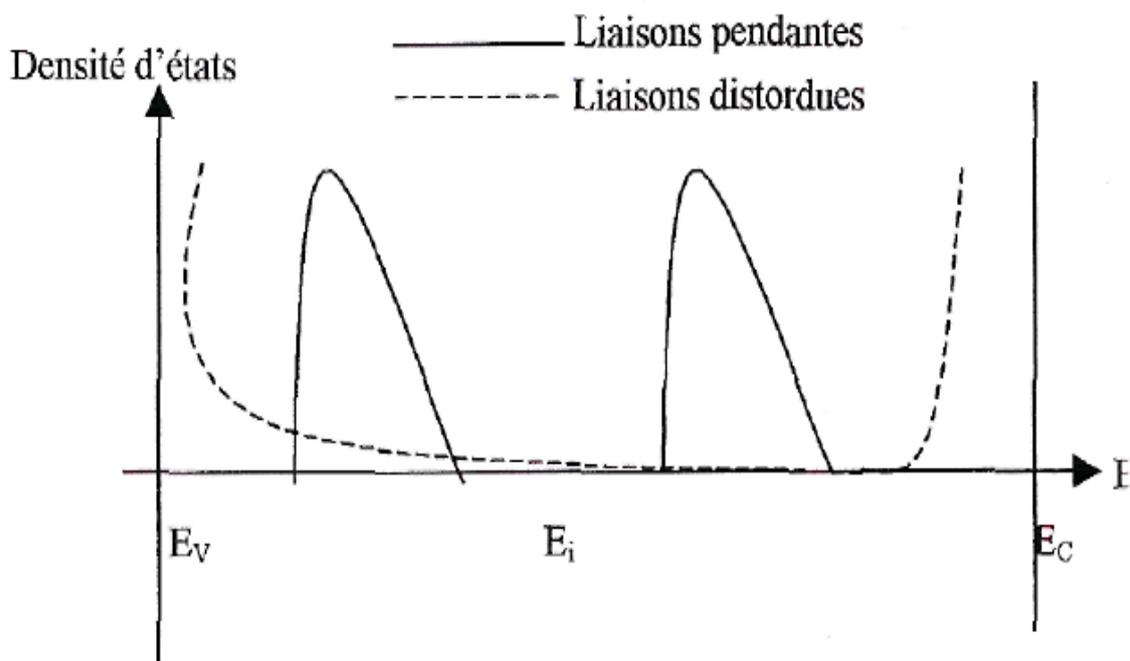
Figure (I-20) : classement des défauts dans l'isolant des structure MOS en fonction de leurs localisation (a) et de leurs réponse électrique (b)

L'hydrogène, en apportant un électron à l'atome de Silicium auquel il se lie, passive le défaut, le rend ainsi inactif. Un tel groupement, noté Si₃-SiH, correspond au centre PbH illustré sur la (figure 1.17) avec le numéro 4.

Les liaisons pendantes peuvent être aussi comblées par des atomes tels que le Chlore, le Fluor ou le Deutérium (isotope naturel de l'hydrogène). [18]

III.4 Les liaisons distordues

Les liaisons distordues ainsi que les faibles interactions sont aussi à l'origine des états d'interface. Par exemple, les lacunes d'oxygène ou les liaisons faibles Si-Si, illustrées par le défaut 2 de la figure 1.8, donnent un état liant dans la partie inférieure de la bande interdite et un état anti-liant dans la bande de conduction. Les liaisons et interactions du type Si-O donnent des états dans la partie supérieure de la bande interdite. En considérant une multitude d'états très proches énergétiquement les uns des autres et dont le nombre décroît avec la profondeur dans l'isolant, Sakurai et Sugano arrivent à une densité d'états en forme de U dans la bande interdite, comme illustré sur la (figureI-21) . [18]



Figure(I-21) : Représentation Schématisée de la densité d'états d'interface introduits par les Liaisons pendantes et distordues.

CONCLUSION :

Le premier chapitre à présenter le dispositif qui a fait l'objet de notre étude et la base de toutes technologies innovantes celui de transistor MOS à effet champs dont nous avons expliqué d'une manière générale les caractéristiques physiques et électriques de sa structure ; ainsi que son fonctionnement. La miniaturisation des transistors vers des dimensions de plus en plus petites amélioré les performances pour un prix de revient réduit ; mais cette réduction est accompagnée par l'apparition des défauts localisés à l'interface Si-SiO₂ et dans l'oxyde ; il en résulte une dégradation globale des paramètres qui déterminent ces performances ; de ce fait l'oxyde de grille et sa qualité intrinsèque et son interface avec le substrat silicium est l'un des paramètres moteur pour assurer le bon fonctionnement du transistor mais sa fabrication peut induit à des défauts électriquement actifs .

Alors pour pouvoir mettre en évidence des solutions pour atténuer ces phénomènes on utilise la méthode de pompage de charge dépendant de spin.

Introduction :

On a vu dans le premier chapitre que le transistor MOSFET domine l'industrie électronique : du transport et la communication à la médecine et autre, en assurant un bon fonctionnement et une meilleure fiabilité, mais, ce dernier peut avoir des défauts dans la structure, ces défauts agissent comme étant des piègeages ce qui provoquent une limitation de performances des circuits intégrés et par conséquent des appareils. Il est donc nécessaire de comprendre le mécanisme de ce piègeage qui joue un rôle principal dans la caractérisation des défauts aussi pour la recherche et l'optimisation de nouveaux matériaux électroniques.

Pour cela de nombreuses méthodes expérimentales existent pour l'étude des propriétés de ces défauts et comme dans les semi-conducteurs les défauts sont généralement paramagnétiques, l'électron est caractérisé par son spin, la résonance de ce dernier est particulièrement adaptée dans la structure microscopique d'un défaut cela sert comme une sonde qui peut déterminer expérimentalement les propriétés d'un matériau.

Dans ce chapitre on va aborder les concepts théoriques des techniques de caractérisation de la spectroscopie à résonance paramagnétique dont on cite : EPR (Electron paramagnétique resonance), EDMR qui se divisent en trois spectroscopies principales : Spin-Dependent Recombination (SDR), Spin Spin-Dependent tunneling (SDT) et Spin-Dependent charge pumping (SDCP) qui sont utilisées pour l'identification de défauts responsable dans la dégradation dispositif électronique .[19,20]

I-magnétisme de la matière :

I-1-introduction au magnétisme :

I-1-1-notion de spin :

La mécanique quantique considère un spin comme étant une observation mystérieuse qui n'a pas d'analogie précise , contrairement à l'impulsion et au moment cinétique, le spin est une propriété des particules atomiques qui possède un degré de liberté intrinsèque il ne dépend pas de position spatiale , il est un concept abstrait qui décrit une propriété fondamentale de la nature comme la charge électrique ou la masse , il est représenté en classique comme une rotation d'une particule sur elle-même ,en résumé c'est un petit aimant tournant sur lui-même (voir figure II-1) . [21]

Ce mouvement de rotation provoque une aimantation parallèle à l'axe de rotation, mais ce n'est qu'une analogie car la mécanique au niveau microscopique est très déférente de la mécanique classique.

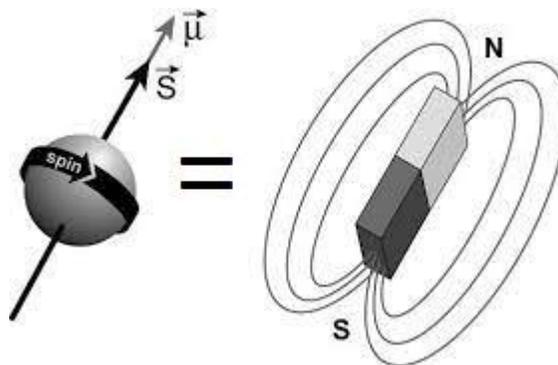


Figure (II-1) : représentation schématique d'un spin [21]

Le spin possède une propriété fondamentale, il ne possède que deux états possibles l'un est orienté vers « le haut » et l'autre « vers le bas », qui sont d'une énergie différente afin de basculer d'un état à un autre il est nécessaire de fournir certaine énergie. [21]. (Voir figure II-2)

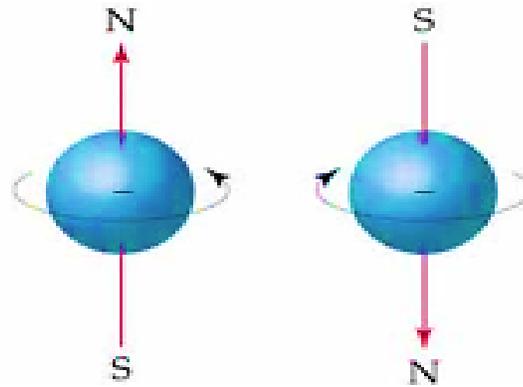


Figure (II-2) : représentation des états d'un spin [21]

Une autre propriété dite « la résonance », les spins tournent autour d'un axe (\mathbf{B}_0) sous l'effet d'un champ magnétique externe en formant un cône (comme une toupie) (voir figure II-3), avec une fréquence qui mesure le nombre de fois ou un phénomène périodique se produit par unité de temps appelé fréquence de résonance elle est plus élevée que le champ magnétique, si on applique une onde électromagnétique on aura un apport de quantité d'énergie qui permet aux spins de transiter d'un état bas vers un état haut par effet de résonance qui sera défini par la suite de cette section, cet effet permet la manipulation des spins et ouvre la voie aux techniques de la résonance paramagnétique qui sera le but de notre chapitre .[21]

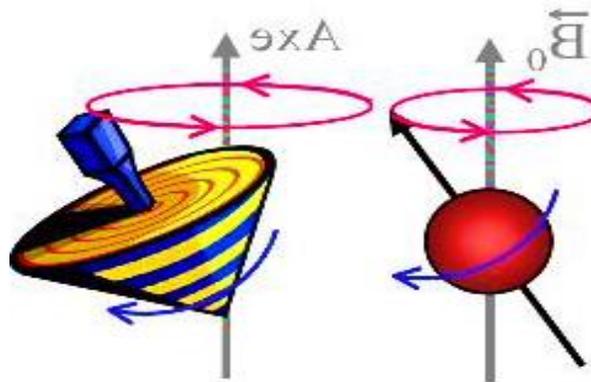


Figure (II-3) : orientation des spins dans un champ magnétique [21]

I-2- moment magnétique :

Un matériau est un ensemble de cristaux où chaque cristal est une structure spatiale périodique d'ion, chacun de ces ions étant formé d'un noyau et d'un nuage d'électrons à l'intérieur de Chaque atome les électrons est en mouvement autour d'un noyau. Le moment magnétique total de l'atome est la somme des moments orbitaux et des moments de spins. [22,23]

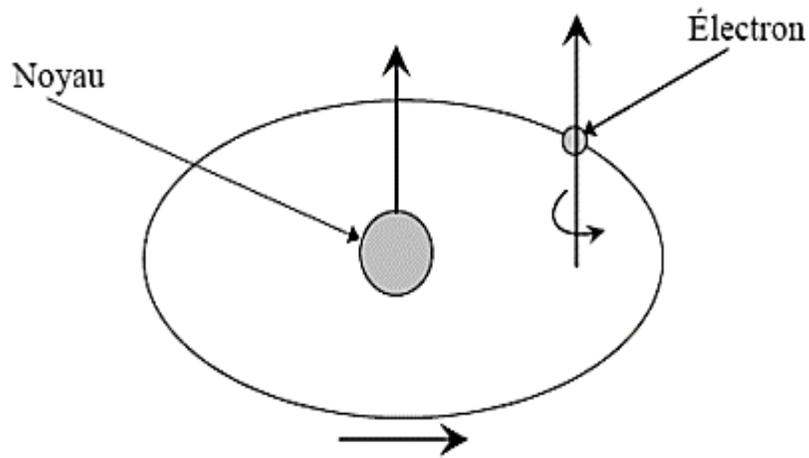


Figure (II-4) : Mouvement de l'électron. [23]

A partir de là deux notions élémentaires peuvent être définies : le moment orbital et le moment magnétique.

I-2-1- moment orbital :

En physique, l'électron décrit une orbite quasi-circulaire autour d'un noyau, dont le déplacement de charge est équivalent à un courant qui peut s'écrire sous la forme : [22,23]

$$i = e.f \quad \text{Eq (II.1)}$$

Où

- **F** : sont le nombre de tours par seconde ;

e : charge d'électron.

D'après la loi d'ampère, ce courant circule dans une spire confondus avec l'orbite crée un mouvement magnétiques appelé « moment orbitale » décrit sous la forme :

Où :

$$m_m = \pi.r^2.i.n \quad \text{Eq (II.2)}$$

n : est la normale orientée à la surface de la spire

r : est le rayon de l'orbite électromagnétique supposé circulaire.

I-2-2-moment de spin :

Le spin de l'électron est décrit comme étant la rotation de cet électron sur lui-même qui présente un moment magnétique de spin (m_s) ; qui représente une propriété purement quantique des électrons définit comme suit :

$$m_s = \frac{e h}{2m 2\pi} \quad \text{Eq (II.3)}$$

Où :

e : est la charge d'électron ($e = -1.607 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) ;

m : la masse d'électron ($m = 9.107 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) ;

h : est la constante de Planck ($h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$).

I-3-effet Zeeman :

Un électron isolé dans l'espace ; sans appliquer aucune force, il possède un moment angulaire dit spin, le mouvement de cette particule chargée génère un champ magnétique, autrement dit un électron soumis à sa charge et son mouvement angulaire agit comme un petit barreau aimanté ou un dipôle magnétique avec un moment magnétique (μ). [24]

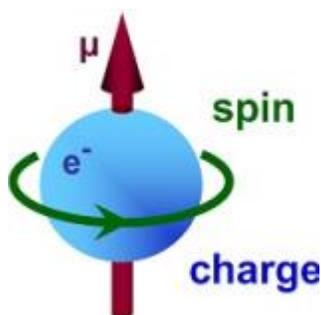


Figure (II-5) : moment magnétique d'un électron libre [24]

Les différences d'énergies (ΔE) étudiées par la suite dans la spectroscopie (RPE) sont dues principalement à l'interaction des électrons non appariés dans un échantillon avec un champ magnétique produit par aimant dans laboratoire, cela porte le nom effet Zeeman .

Le champ magnétique B_0 produit deux niveaux d'énergies pour le moment magnétique de l'électron il peut avoir un état de plus basse énergie lorsque le moment magnétique est aligné avec le champ magnétique, et un état d'énergie plus élevée lorsque il est aligné contre le champ magnétique .

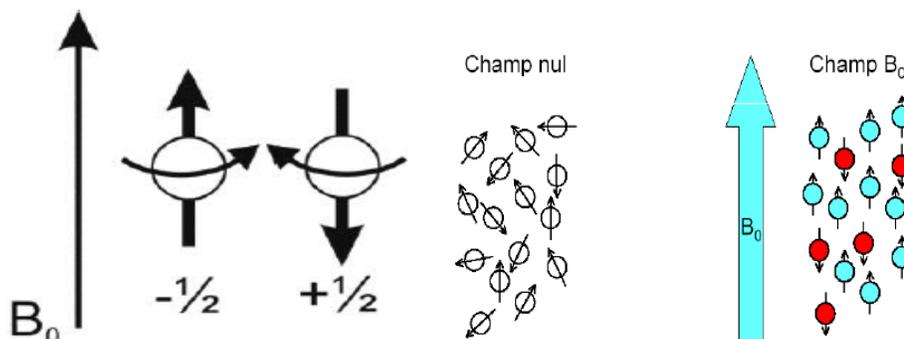


Figure (II-6) : Orientations d'énergie minimales et maximales de e^- par rapport au champ magnétique B_0 [24,25].

Chapitre II : Technique de résonance paramagnétique électronique

La projection de l'opérateur de spin de chaque électron sur la direction du champ magnétique définit les deux états d'énergies, l'électron à un spin 1/2 peut être : [24]

- à l'état parallèle, position la plus stable désigné par $M_S = -1/2$;
- à l'état antiparallèle, position la moins stable désigné par $M_S = +1/2$

. (Voire figure II-6 et II-7)

Pour un électron l'énergie de chaque orientation représente le produit de (μ) et (B_0) sous forme

Où :
$$\mu = m_s \cdot g_e \cdot \beta \quad \text{Eq (II-4)}$$

β : constante appelé magnéton de Bohr ;

g_e : le facteur g-spectroscopique ; pour un électron libre ($g_e \approx 2,00$).

Les énergies pour un électron avec $M_S = +1/2$ et $M_S = -1/2$ respectivement :

$$E_{1/2} = -1/2 g_e \beta B_0 \quad \text{Eq (II-5)}$$

$$E_{-1/2} = +1/2 g_e \beta B_0$$

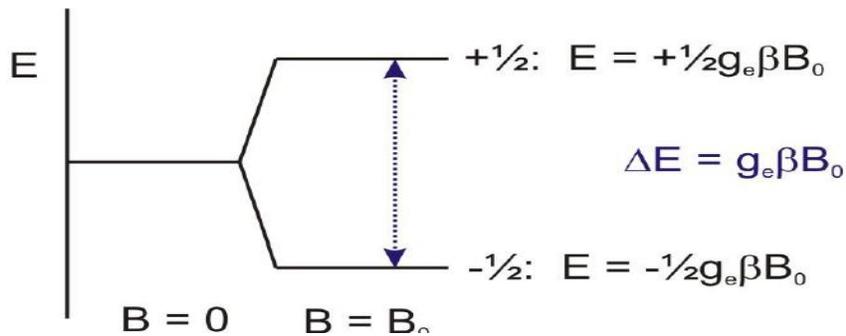


Figure (II-7) : Induction des énergies d'état de spin en fonction du champ magnétique B_0 [24].

L'énergie correspondante aux deux niveaux varie linéairement avec le champ magnétique, en résumé c'est un phénomène quantique appelé effet Zeeman correspond à la levée des niveaux d'énergies d'un moment magnétique sous l'effet du champ magnétique externe. [24]

I-4-notion de résonance :

I-4-1- phénomène de résonance :

La résonance consiste un changement des niveaux énergétiques d'un noyau d'un état fondamentale α (suivant la direction B_0) à un état énergétique défavorable β (antiparallèle à B_0) cette transition se fait par l'application d'un champ magnétique B_1 perpendiculaire à B_0 et une onde radiofréquence (RF), pour avoir le phénomène de résonance il est recommandé que l'onde radiofréquence appliqué soit égale à la fréquence de la précession du noyau. [25]

La résonance met en évidence expérimentalement les énergies d'interaction entre un noyau et un champ magnétique, ce phénomène consiste à fournir une quantité d'énergie nécessaire pour basculer d'un état à un autre via une onde électromagnétique varie de façon périodique avec une fréquence ν ; elle ne peut échanger son énergie avec la matière que par quantité finie dite quanta d'énergie ΔE : [25]

$$\Delta E = h \cdot \nu \qquad \text{Eq (II-6)}$$

Où :

- h : est la constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s).

Pour obtenir un saut énergétique, cette condition est insuffisante, il faut aussi que les états final et initial soient liés par des règles de sélections, la transition énergétique doit aussi être accompagnée par une variation de m_I .

$$\Delta m_I = \pm 1 \qquad \text{Eq (II-7)}$$

L'onde électromagnétique agit sur le moment magnétique du noyau par un champ magnétique B_1 , son intensité plus faible que celle de B_0 (environ dix mille fois) ; ce champ faible peut transiter une énergie d'un état énergétique à un autre état moins stable justifier le terme de résonance. [36]

I-4-2-condition de résonance :

Pour avoir une transition de résonance paramagnétique électrique il faut tenir compte de certaines conditions :

- Un champ magnétique statique (H_0) provoquant la levée de dégénérescence (Effet Zeeman électronique) ;
- Envoyer une onde électromagnétique ($H_1 \cos 2\omega t$) perpendiculairement à H_0 .

La transition a lieu lorsque la condition de résonance $\Delta E = h \nu = E_\alpha - E_\beta = g_e \beta H_0$ est réalisée.

Généralement, compte tenu de la valeur de $g_e \beta$, on travaille à fréquence fixe (diode Gunn délivrant une onde HF stable) et on balaie en champ.

Pour une fréquence d'environ 9.5 GHz, la condition de résonance est vérifiée lorsque H_0 est voisin de 3300 G (0.3 Tesla). [26,27]

II-présentation des techniques expérimentales :

II-1- résonance paramagnétique électronique (RPE):

II-1-1-introduction à la résonance paramagnétique électronique :

La résonance paramagnétique électronique (RPE) a été découverte par un savant russe en 1945, Zavoïsky, qui a effectué la première observation d'un signal RPE

Chapitre II : Technique de résonance paramagnétique électronique

La rotation d'un électron sur lui-même correspond à un nombre quantique de spin (S) caractérisé par des valeurs propres ($\pm 1/2$) à deux orientations que peut prendre un spin lorsqu'il est soumis à un champ magnétique externe l'une sera parallèle et l'autre antiparallèle au champ magnétique appliqué. Par conséquent deux niveaux d'énergies résultent entre les quels des transitions peuvent avoir lieu, le but de la résonance paramagnétique électronique est précisément l'étude de ces transition. Pour désigner une telle spectroscopie plusieurs termes sont associés dans la littérature anglo-saxon : [28]

- ESR : électron spin résonance : cette expression résume que l'électron est le seul élément qui joue le rôle important, ce qui est faux du moment que même le moment orbital intervient ;
- EPR : électron paramagnétique résonance est le plus utilisé en français c'est RPE

II-1-2- principe fondamentale de la résonance paramagnétique électronique :

La spectroscopie résonance paramagnétique électronique est un puissant moyen des espèces contenant des centres paramagnétiques, c'est-à-dire, ayant un électron ou plusieurs électrons non appariés tel que les défauts paramagnétiques dans les dispositifs à semi-conducteurs [26,29] , il s'agit d'une spectroscopie analytique qui a le pouvoir d'identifier et de quantifier les défauts à l'échelle atomique dans des dispositifs , et fournir des informations sur la nature structurelle et chimiques des défauts dominant dans l'échantillon, cette technique est sensible a tous les défauts paramagnétiques situés dans un échantillon, elle a été démontré comme étant un outil efficace dont l'identification des propriétés chimiques et structurelle des défauts de limitation de la performance dans les systèmes si/sio₂ [30]

Le principe de la résonance paramagnétique électronique repose sur l'effet Zeeman et la notion de résonance soumis à l'action d'un champ magnétique externe intense ; la résonance paramagnétique électronique implique l'interaction du rayonnement électromagnétique avec des moments magnétiques électroniques.

L'électron libre (non apparié) en raison de son spin possède un moment magnétique qui favorise en sens parallèle ou antiparallèle au champ appliqué, il en résulte une division discrète des niveaux d'énergies, lorsque la magnitude de ce fractionnement d'énergie correspond à

Chapitre II : Technique de résonance paramagnétique électronique

l'énergie du rayonnement électromagnétique appliquée on observe la résonance. Le phénomène de la RPE est basé sur le fait qu'un électron est une particule chargée qui tourne de son axe, en langage technique, l'électron possède un moment magnétique μ en raison de son spin. [29]

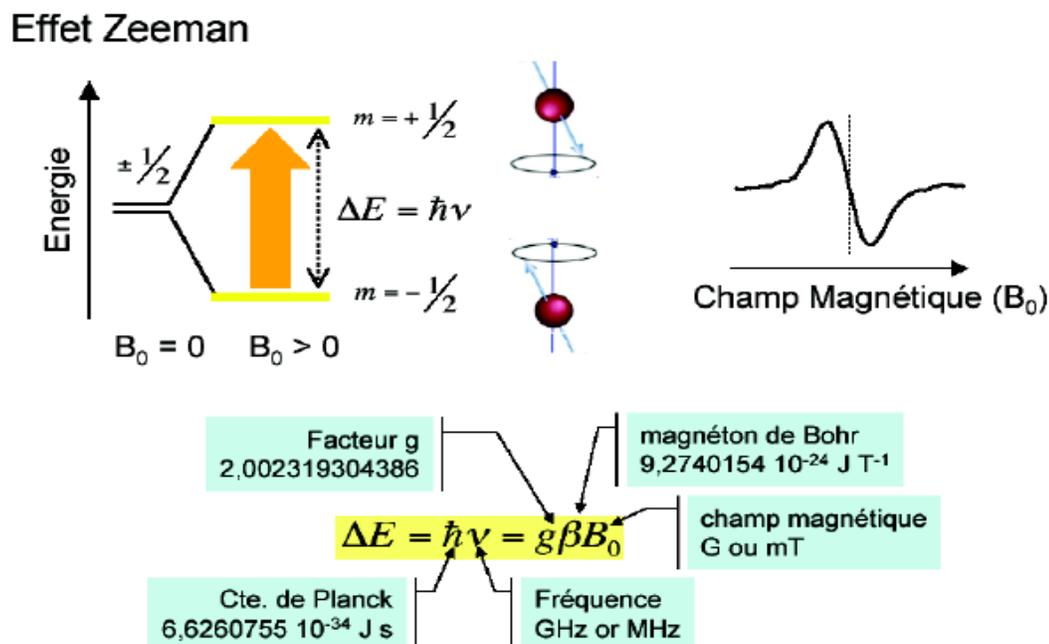


Figure (II-8) : principe de fonctionnement de l'EPR [24]

Dans la résonance paramagnétique électronique un échantillon est exposé à un champ magnétique externe variable lentement à une énergie micro-onde constante exprimé comme le produit de la constante de Planck (h) et la fréquence micro-onde (ν), lorsque l'énergie des micro-ondes est égale à la division d'énergies des électrons due à l'effet Zeeman, la résonance se produit (figure II-8), et l'électron dans l'état d'énergie inférieur est capable d'absorber l'énergie appliquée est renverse son orientation de spin à celle de l'état d'énergie supérieur, de même l'électron dans un état d'énergie supérieur est capable de libérer de l'énergie et basculer son orientation à celle de l'état d'énergie inférieur, d'après les statistiques de Boltzmann, l'échantillon a une absorption d'énergie c'est le phénomène de la RPE et pour le cas d'un électron isolé peut s'exprimer comme suit : [31]

$$h \cdot \nu = g_e \cdot \beta B_0 \quad \text{Eq (II-8)}$$

- β magnéton de Bohr ($\beta = 9,274015 \cdot 10^{-28}$)
- g_e : la valeur de l'électron libre ($g_e = 2,002319$)
- B_0 : l'amplitude du champ magnétique appliqué

II-2- résonance magnétique électriquement détectée EDMR :

La spectroscopie résonance paramagnétique électronique RPE avait prouvé et continuerait à prouvé une excellente technique de caractérisation pour la plupart des matériaux, sachant que ces derniers s'améliorent d'avantage cela nécessite des techniques de mesure supplémentaire pour l'identification des défauts, quels défauts, à titre d'exemple, affectent les performances de l'appareil à l'interface et aux régions de jonction de ces transistors ?

Pour cela il fallait alors étudier le comportement de ces défauts pendant le fonctionnement de l'appareil, avec des concentrations inférieures à celles détectées par RPE ($\approx 10^{10}$ défauts / cm³) en 1972, lepine a pu répondre à certaines de ces questions importantes avec l'introduction de la technique RPE, Spin Dependent Recombination (SDR)., cela a encouragé également une catégorie générale de résonance magnétique détectée électriquement (EDMR), des techniques qui sondent les événements physiques à l'échelle atomique qui limitent l'efficacité du dispositif [31] .

II-2-1-théorie de résonance magnétique électriquement détectée EDMR :

La résonance magnétique détectée électriquement, connus également sous le nom recombinaison dépendant de rotation, EDMR est l'abréviation en anglais Electrically Detected Magnetic Resonance ; elle dérive de la spectroscopie classique RPE ; cette technique a été appliqué pour de nombreux dispositifs vu son efficacité d'étude des processus de transport et les défauts ponctuels dans les semi-conducteurs ; EDMR ; par exemple ; a été utilisée pour étudier la recombinaison et le transport de spin dans les motifs amorphes et microcristallins , les dispositifs

à base de silicium et les défauts dans le silicium et l'interface si /sio₂ , le principal avantage de EDMR par rapport à EPR classique est la sensibilité, aussi une méthode quantitative, le nombre de spins détectable est de l'ordre 10⁶ [20]

La RPE et EDMR ont été utilisées dans cette étude car sont des techniques complémentaires ; EDMR a l'avantage de ne détecter que les défauts qui sont spécifiquement dans la partie active d'un dispositif semi-conducteur, mais ne fournis pas de profil de profondeur quantitatif des défauts [32] .Nous allons introduire trois techniques : Les spectroscopies Spin-Dependent Recombination (SDR), Spin-Dependent tunneling (SDT) et Spin-Dependent charge pumping (SDCP) sont des techniques RPE dans les quelles la résonance est détectée, respectivement, par la mesure de courant de recombinaison, de courant tunnel et de courant de pompage de charge, ces techniques sont appelées « Electrically Detected Magnetic resonance. » [30] .

II-2-1-1-recombinaison dépendant du spin (Spin -Dependent Recombination SDR) :

Les processus de recombinaison dépendant du spin sont largement observés dans EDMR ces processus ont été interprétés en terme paire de spin, ou bien model donneurs-accepteurs tel que le processus observé dans le silicium dopé au phosphore ; ou les paires de spins se sont formées soit par les centres dit (P_{b0}) ou par les donateurs (³¹P) qui se présentent à l'interface si/sio₂ Le processus de recombinaison sert d'exemple dans EDMR pour étudier les propriétés de base de recombinaison paire-spin d'une part ; enquêter sur les donateurs ³¹P près de l'interface si/sio₂ ; peut aussi étudier l'influence de l'interface proche sur diverse propriétés de spin avec la grande sensibilité de EDMR, les donateurs peuvent aussi être utilisé pour l'étude des défauts paramagnétiques à l'interface si/sio₂ [2]

II-2-1-1-1- présentions et principe de la SDR :

La recombinaison dépendante de spin est l'une des techniques EDMR démontré par lepine, la plus couramment utilisée, elle peut effectuer des mesures d'EPR sur les dispositifs complètement traités tel que les dispositifs dans les circuits intégrés, elle présente un très bon antécédent d'identification des défauts dans les transistors à base de silicium et sic, en SDR ; la

nature dépendant de rotation des événement de recombinaison est exploitée de sorte qu'on puisse observer par la mesure des courants de recombinaison .

La recombinaison dépendant du spin adapte le phénomène de renversement de spin EPR pour modifier le courant de recombinaison dans les dispositifs traités, sous la résonance une modification du courant de l'appareil (ΔI) se produit en raison de la présence des défauts de recombinaison indésirable dans les dispositifs, les centres de recombinaisons sont rendus paramagnétiques et analogue comme dans EPR ; ils apparaîtront dans le spectre observé pour fournir des détails sur la structure atomiques impliqué ; dans la SDR classique le dispositif est polarisé de sorte que le courant de source /drain vers substrat est dicté par une recombinaison dans l'interface du transistor [30]

la SDR a été expliquée par le model Lepine qui regroupe le model Shockley-Read-Hall (SRH) et le principe d'exclusion de Pauli (voir figure II-9), dans la recombinaison de SRH le piège est du niveau plus profond héberge comme un site de capture et permet la recombinaison à la fois d'un électron de conduction et d'un trou de valence, le processus de capture est interdit par le principe d'exclusion de Pauli qui stipule que deux électrons avec un même nombre quantique de spin ; ne peuvent pas occupés le même orbital ; la recombinaison est un phénomène dépendant du spin

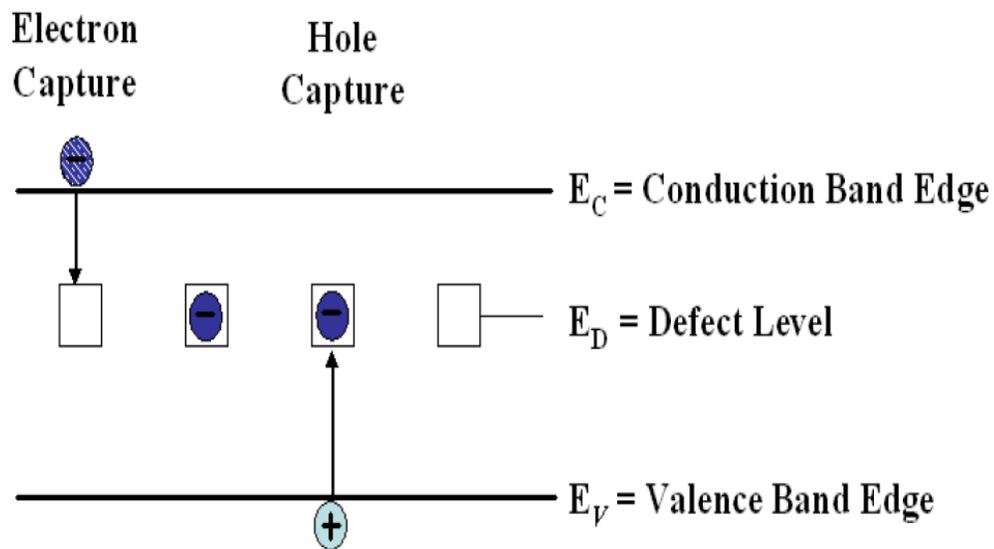


Figure (II-9) : illustration schématique du modèle shockley read hall pour la recombinaison [30]

Cependant le placement de l'échantillon de semi-conducteur dans un champ magnétique réduit la section moyenne de capture de piège, dans SDR des rotations des électrons sont renversées d'une orientation de rotation à l'autre lorsque la résonance est satisfaisante, l'événement de renverser augmente la probabilité des pièges contrairement orienter et des rotations d'électron de conduction permettent la recombinaison. Ce processus illustré sur la figure (II-10) augmente le courant de recombinaison [30,34] comme suit : si les électrons de conduction et les électrons à niveau profond pointent de la même manière l'événement de piégeage sera interdit (à gauche de la figure II-10), en satisfaisant l'état ESR, nous basculons le niveau profond de Spin, permettant l'événement de capture (à droite de la figure II-10). Cela augmente le courant lorsque la condition ESR est satisfaite

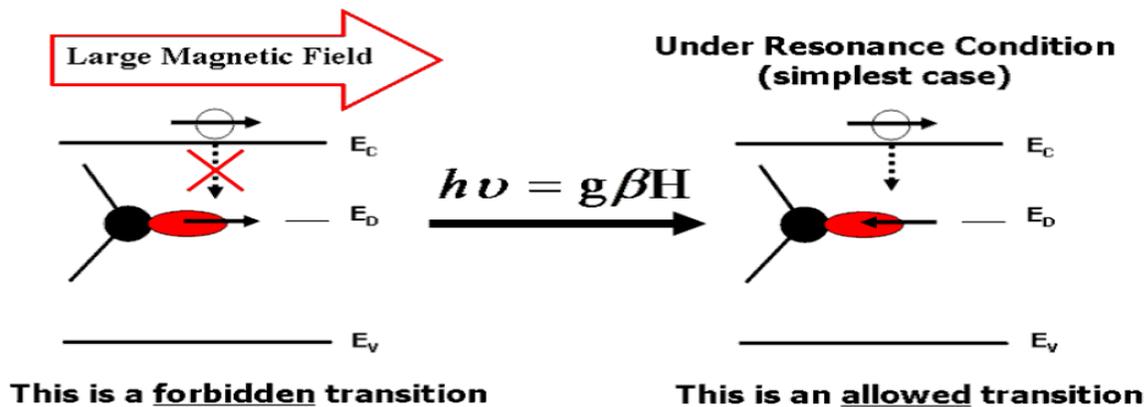


Figure (II-10) : phénomène des SDR. [30]

II.2.1.2. Tunnel dépendant du spin (Spin-Dependent tunneling SDT) :

La technique SDT est une spectroscopie EDMR qui se présente sous des principes très similaire avec ceux de la spectroscopie SDR, la différence c'est que SDT consiste à mesurer le courant tunnel dans les transistors à effet champ par contre au SDR il s'agit de surveiller le courant de recombinaison. SDT peut identifier la nature chimique et structurale des défauts situer dans la diélectrique selon le mécanisme suivant :

On souhaite que le courant du substrat soit dominé par un courant tunnel assisté par piégeage à travers le diélectrique de grille. Le dispositif est placé dans un grand champ magnétique à variation lente qui polarise partiellement les spins des électrons, des trous, ainsi que les spins de défauts de niveau profond paramagnétiques

SDT peut être expliqué qualitativement en considérant le tunnel d'un électron d'un site central paramagnétique à un autre site paramagnétique dans un diélectrique ; le processus ne serait autorisé que si les électrons non appariés tournent sur les deux sites paramagnétiques qui ont des nombres quantiques de spin opposés, si les deux sites avaient des tours d'électrons avec le même nombre quantique de spin le processus de tunnel serait interdit car, une fois terminé, l'un des sites paramagnétiques posséderait deux électrons avec le même nombre quantique de spin, cela serait interdit par le principe d'exclusion de Pauli (voir figure II-12), Cependant, si l'un des spins de l'onde des sites paramagnétiques devait être "retourné" via EPR ($h\nu = g\beta H$), l'événement de tunnel envisagé précédemment serait autorisé, ainsi, la résonance magnétique pourrait moduler un tel processus à la résonance, le processus de tunnel assisté par piège serait amélioré, cette amélioration du courant tunnel peut être détectée par une augmentation de ce courant qui est le spectre SDT.[30,35]

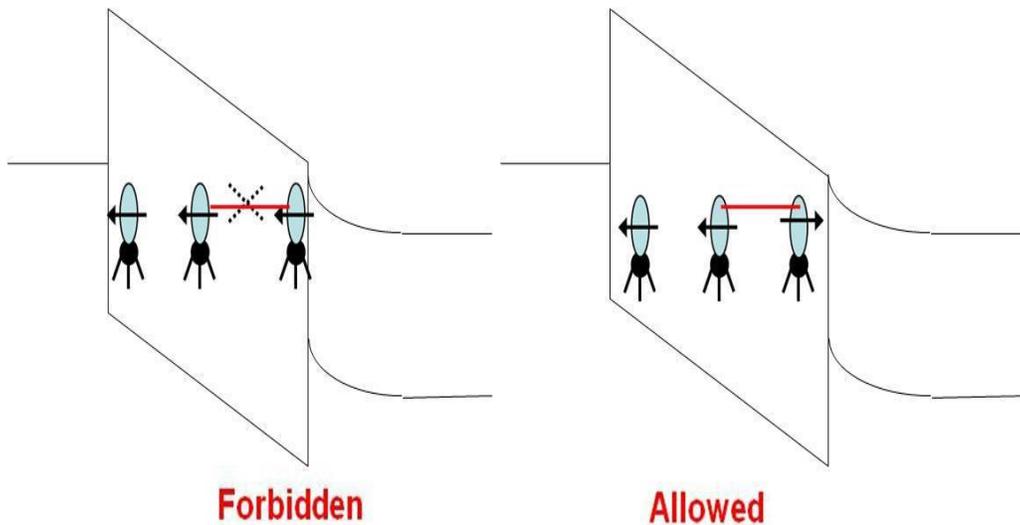


Figure (II-11) : phénomène schématique SDT

II-2-1-3- pompage de charge dépendant spin (Spin-Dependent charge pumping SDCP) :

II-2-1-3-1-description de la méthode SDCP :

La technique de pompage de charge (Spin-Dependent charge pumping SDCP) à été introduite par Brugler et Jespers pour la première fois en 1969 [15] ; qui stipule que lorsque on applique une série d'impulsion sur la grille du transistor MOS afin d'amener successivement la surface du semi-conducteur en inversion et en accumulation, un courant de substrat apparaîtra par le processus de recombinaison des porteurs ; ce phénomène qu'il ont appelé pompage de charge s'effectue au travers des pièges de l'interface Si/SiO_2 . Brugler et Jespers ont développé un modèle simple permettant d'extraire la densité moyenne des états d'interface.

Bien que la recombinaison dépendant du spin exploite le fait que la capture des porteurs de charges à des défauts du niveau profond paramagnétique dépend du spin ; elle permet la mesure de résonance dans les dispositifs semi-conducteur et les transistors MOSFET ; cependant SDR a plusieurs limites dans l'étude des MOSFET ; SDR n'est que sensible aux défauts situé près du centre de la bande gap ; ne peut pas être utilisé pour l'étude des défauts au bord de la bande gap ; pour cela la technique paramagnétique électriquement détectée très puissante SDSP est appliquée au transistor a effet champ .

Le pompage de charge dépendant du spin (SDCP) est une technique EDMR dans laquelle une mesure de pompage de charge électrique est utilisée pour créer un courant de recombinaison pendant une mesure de résonance ; aussi un outil de caractérisation électrique largement utilisé offre une grande amélioration de la sensibilité par rapport à la méthode EDMR précédente établie SDR son avantage donne un accès à une importante gamme d'énergie dans la bande gap ; cette technique caractérise les défauts d'interface des transistors à effet champ ; fournis des informations plus détaillées purement électronique ; mais ne fournis pas les informations sur la structure à l'échelle atomique [30,33]

II-2-1-3-2- principe de fonctionnement :

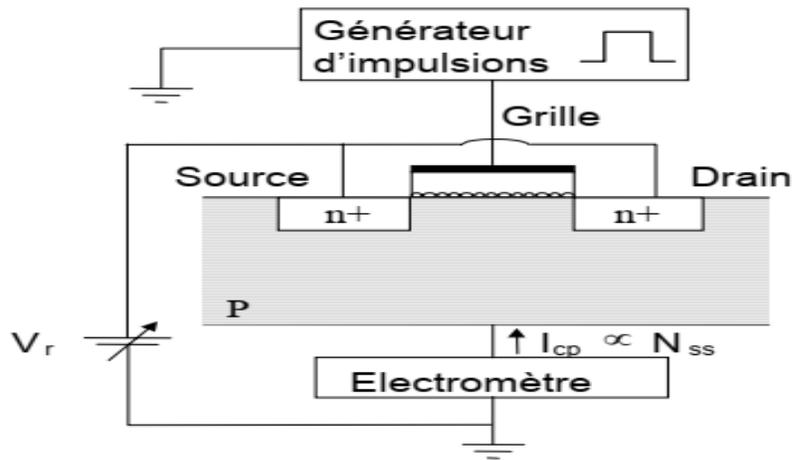


Figure (II-12) : montage expérimental utilisé en pompage de charges [33]

La surface du semi-conducteur est polarisée successivement en accumulation et inversion par la tension V_g (voir la figure II-11) ; dans le cas d'un transistor à canal n la portion en gris du dessin représente les états occupés par des électrons.

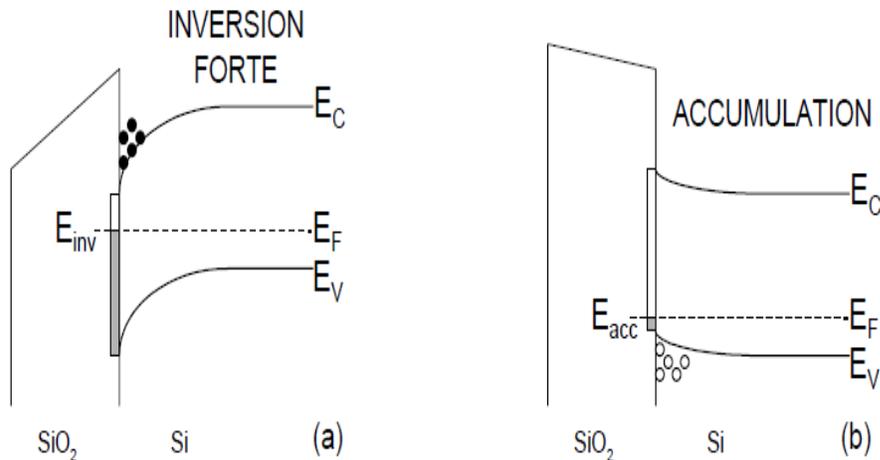


Figure (II-13) : Situations énergétiques à l'équilibre (NMOS) (a) inversion forte et (b) cumulation [33]

Chapitre II : Technique de résonance paramagnétique électronique

- Durant l'inversion, les porteurs minoritaires provenant de la source et de drain forment la couche d'inversion et une partie d'entre eux est capturée par les états d'interface situés sous le niveau d'énergie E_{inv} (figure II-11.a). Lors du passage d'une inversion à une accumulation, les porteurs minoritaires qui formaient la couche d'inversion repartent vers les régions de source et de drain sous l'influence de la tension inverse.
- Durant l'accumulation, les porteurs majoritaires du substrat sont capturés à leur tour par les états d'interface situés au dessus de l'énergie E_{acc} où ils se recombinent avec les porteurs minoritaires précédemment piégés (figure II-11.b). [33]

Ainsi à chaque période du signal de grille, des porteurs minoritaires provenant des régions de source et de drain se recombinent donc avec des porteurs majoritaires du substrat ce qui donne lieu à un courant de substrat ; Brugler et Jaspers considèrent que les états d'interface qui participent à la recombinaison sont ceux compris énergétiquement parlant entre les positions du niveau de Fermi à l'interface en inversion et en accumulation, E_{inv} et E_{acc} . En considérant une densité d'états d'interface, N_{ss} , indépendante de l'énergie et uniforme le long du canal, la charge recombinaisonnée, Q_{cp} , s'exprime alors par :

$$Q_{cp} = AqN_{ss}(E_{inv} - E_{acc}) \quad \text{Eq (II-9)}$$

où

A : est l'aire de grille et q la charge de l'électron.

Le courant de pompage de charges, I_{cp} , est relié à la charge par la fréquence, f , du signal de grille selon :

$$I_{cp} = fQ_{cp} = AqfN_{ss}(E_{inv} - E_{acc}) \quad \text{Eq (II-10)}$$

En changeant la longueur des transistors, la tension inverse des jonctions de source et de drain et en comparant les résultats obtenus avec des impulsions carrées et triangulaires,

Brugler et Jaspers mettent en évidence le fait que lors du retour vers l'accumulation, une partie des porteurs minoritaires du canal peut ne pas avoir le temps de rejoindre les régions de source et de drain. Ces porteurs se retrouvent alors dans le substrat où ils se recombinent en donnant une composante additionnelle de pompage de charges qu'ils appellent « composante géométrique ». [33]

Conclusion :

Après la découverte de la spectroscopie de la résonance paramagnétique électriquement détectée EDMR s'est rapidement développée et a été un support d'étude pour de nombreuses recherches d'identification des défauts dans la structure atomique des semi-conducteurs.

Nous avons constaté que l'identification des défauts dans l'interface si/sio₂ est un paramètre très important pour comprendre les mécanismes responsables de la dégradation des transistors ; pour pouvoir agir sur les procédés de fabrication afin de diminuer ces défauts.

Dans ce chapitre nous avons définis les concepts théoriques de chaque spectroscopie qui va nous aider par la suite de comprendre les étapes et les résultats expérimentaux de caractérisation d'un transistor VDMOSFET.

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

Introduction :

La technique « EDMR » est la détection des défauts atomiques dans les dispositifs microélectroniques (transistor, diode, capacité...). En intégrant un pont en H dans le spectromètre on va permettre de fournir un grand courant et d'inversé la tension au borne de la bobine d'Helmholtz de spectromètre utilisé.

Pour cela, dans ce chapitre en première partie nous allons présenter les différents matériels utilisé pour mettre en pratique la technique de résonance paramagnétique de spin « EDMR » réalisé au sein du centre de développement des technologies avancées (CDTA) sur un transistor VDMOSFET de type N (IRF840), En seconde partie (la partie expérimentale) nous allons procéder à la présentation réalisation de pont en H avec des transistor VDMOSFET, puis tester et avoir les résultats.

I-spectromètre EDMR (Electrically Detected Magnetic resonance):

I-1- aperçu sur le spectromètre EDMR réalisé :

Electrically detected magnetic resonance (EDMR) est la détection électrique de la résonance paramagnétique électronique (RPE) des défauts atomiques dans les dispositifs microélectroniques (transistors, diode capacité MOS et cellule solaire ...) [37-38] Comme les défauts électriquement activés sont généralement des électrons non appariés (défauts paramagnétiques), ils sont influencés par des champs magnétiques externes qui peuvent modifier divers mécanismes de transport dans les dispositifs tels que la recombinaison (SDR : spin dependent recombination) [39], l'effet tunnel [40] (SDT : spin dependent tunneling), et le pompage de charge (SDCP : spin dependent charge pumping). [41]

Par conséquent, EDMR a trouvé une grande utilité pour l'identification des défauts dans les MOSFET, BJT, diodes, couches minces diélectriques, et les cellules solaires ; la spectroscopie EDMR à faible champ (< 200 Gauss) offre de nombreux avantages significatifs par rapport à EPR conventionnelle ; parmi ces avantages on site :

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

- ❖ Sensibilité 10 millions de fois plus élevée par rapport à celle de l'RPE conventionnelle due à la dépendance du courant mesuré aux mécanismes en relation avec le spin ; [5]
- ❖ Poids sensiblement plus faible ; [42]
- ❖ Le Coût est réduit de manière significative.

I -2-application du spectromètre d'EDMR réalisé :

Le spectromètre réalisé dans ce travail peut être utilisé pour la détection des défauts dans une grande variété de dispositifs, y compris les MOSFET, BJT, les diodes, les cellules solaires et les couches minces diélectriques

En outre, la détection des défauts est possible dans une vaste gamme de systèmes de matériaux, y compris Si, Si/SiO₂, Si/HfO₂, SiC, et SiC/SiO₂, GaN et les semi-conducteurs organiques.

Les spectromètres EDMR à faible champ sont très utiles pour : [43-44] :

- ❖ Spin Dependent recombination (SDR) ;
- ❖ Spin Dependent tunneling (SDT) ;
- ❖ Spin Dependent charge pumping (SDCP) ;
- ❖ Caractérisation de la microstructure des défauts dans les transistors, diodes, capacités MOS, cellules solaires... ;
- ❖ Étude de la fiabilité des dispositifs électroniques (BTS : bias temperature instability, TDDB : time dépendent dielectric breakdown, HCI : hot carrier injection, TID : total ionisation dose...).

I-3- Description du spectromètre réalisé :

L'avantage du spectromètre EDMR proposé, est qu'il se branche directement sur la carte son d'un ordinateur, ce qui lui offre une excellente portabilité.

La figure (III-1) donne un schéma synoptique du produit proposé ; le montage comprend : [45]

- Deux paires de bobines d'Helmholtz ;
- Un circuit résonant ;
- Mesure et acquisition de champ magnétique (gaussmètre);

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

- Alimentation DC programmable ;
- Amplification du signal EDMR ;
- Générateur et amplificateur audio ;
- Générateur et amplificateur radiofréquence ;
- Amplificateur à détection synchrone virtuelle (virtual lock in amplifier) ;
- Régulation PID numérique du champ magnétique.

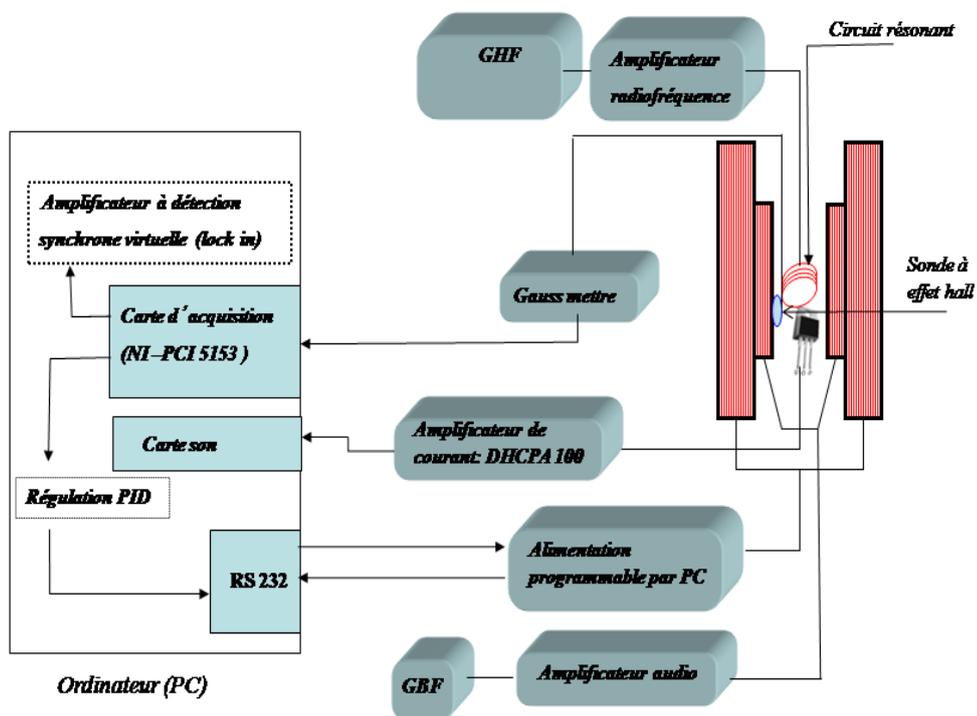
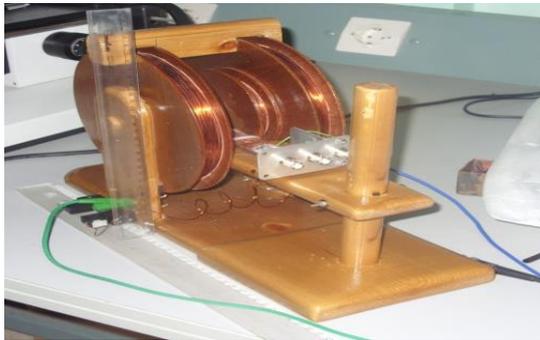


Figure (III-1) : schéma snotique du produit proposé [45]

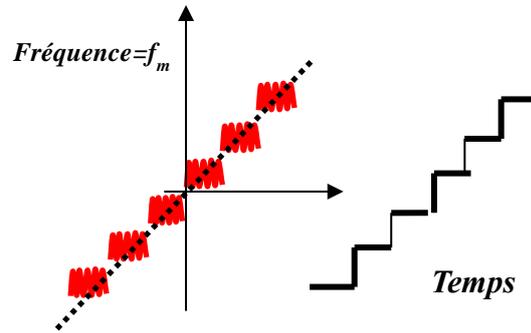
I-3-1-Bobines d'Helmholtz :

Les deux paires de bobines ont pour but de générer un champ magnétique statique uniforme sur le quel est superposé un champ magnétique sinusoïdale ; le but est de moduler le signal EDMR pour pouvoir l'extraire du bruit important du montage. [45] La figure (III-2) présente les deux paires de bobines et le champ magnétique généré par ces bobines.

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ



(a)



(b)

Figure (III-2) : (a) Bobines d’Helmholtz ; (b) champ magnétique généré par les deux paires de bobines. [45]

Les caractéristiques des deux paires de bobines, sont résumées dans le tableau (III-1) :

N°	Spécification	Valeur
1	nombre de tours par enroulement	N _m =400, N _s =700
2	Fil	16SWG
3	Résistance totale	R _m =1,2Ω, R _s =4Ω
4	Diamètre interne de la bobine	r _m =2,5 Cm, r _s =8,5 Cm
5	Largeur de la bobine	H _m = 3cm, H _s =4.5cm
6	Profondeur de la bobine	D _m =1cm, D _s =2 cm
7	Matériel de construction	Amagnétique
8	Voltage	V _m =40V, V _s =10V
9	Masse de la bobine	10kg
10	Intensité du champ magnétique	B _m =20, B _s = 200 Gauss

Tableau (III-1) : Caractéristiques des deux paires de bobine d’Helmholtz, l’indice (m) pour la bobine de modulation et (s) pour la bobine de génération du champ statique [45]

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

I-3-2- Régulation du champ magnétique est génération d'une rampe :

L'information la plus importante extraite par la technique EDMR à faible champ est l'interaction hyperfine (interaction spin d'électron et spin nucléaire) [46] ; l'interaction hyperfine est généralement observée par des résonances additionnelles au voisinage de la résonance principale due à la résonance de spin des défauts paramagnétiques ; si le champ magnétique n'est pas suffisamment précis et contrôlé ; la résonance hyperfine sera chevauchée avec la résonance principale.

Pour cette raison le champ magnétique doit être correctement mesuré et contrôlé (régulation) La figure (III.3) donne le schéma synoptique de la chaîne de mesure du champ magnétique. [45]

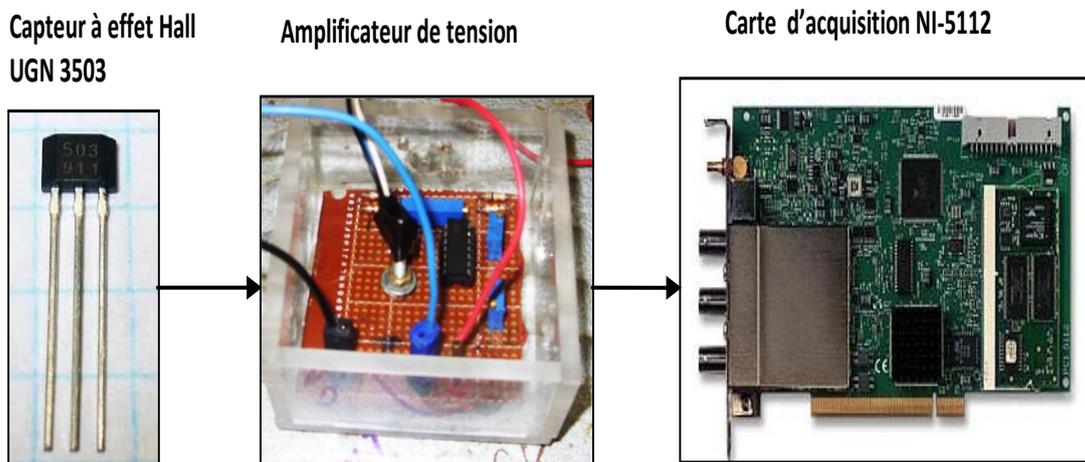


Figure (III-3) : schéma synoptique de la chaîne de mesure du champ magnétique. [16]

Pour réguler et générer une rampe de champ magnétique contrôlable (0-200 Gauss) ; nous avons implémenté sous LabVIEW un régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé) [47] ; ce dernier agit sur une alimentation contrôlée par un microordinateur ; *via* RS 232, pour contrôler le courant qui traverse la bobine, et par conséquent la régulation du champ magnétique.

Le diagramme régulateur PID est donné dans la figure (III-4) :

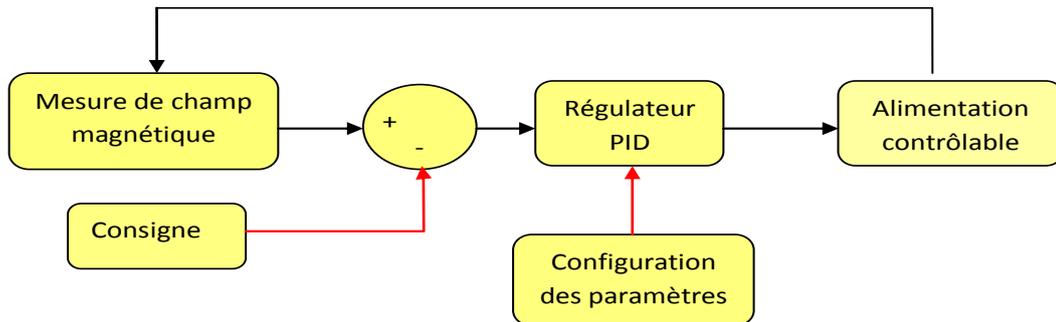


Figure (III-4): le diagramme du programme de régulation du champ magnétique [45]

I-3-3-Modulation du champ magnétique (Générateur basse fréquence et amplificateur audio) :

Pour une meilleure performance de l'extraction du signal EDMR noyé dans le bruit du montage, la fréquence du signal de modulation de champ magnétique doit être supérieure à la fréquence du bruit flicker f_{flicker} ($1/f$ noise) et inférieure à la bande passante de l'amplificateur de signal EDMR (f_c).

Généralement le bruit ($1/f$) noise est fortement atténué pour des fréquences $> 1\text{kHz}$; la bande passante de l'amplificateur dépend du gain choisi, la plus faible est égale à 220 kHz

Par conséquent, la modulation avec un signal audio (1khz-20khz) satisfait largement les deux conditions citées [45] La figure. (III-5) donne le montage de modulation du champ magnétique :

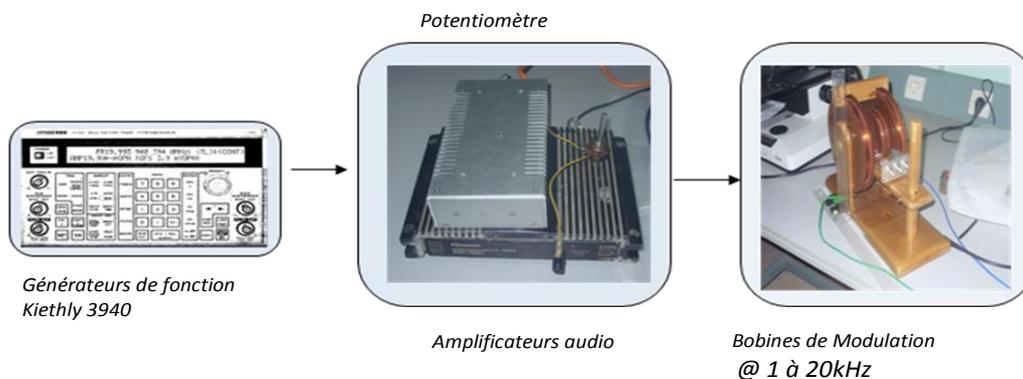


Figure (III-5) : modulation du champ magnétique (générateurs basse fréquence et amplificateur audio). [45]

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

I-3-4-Circuit résonant :

Pour avoir une résonance de spin lorsque l'échantillon est soumis à une application de champ magnétique externe (B), il faut apporter à cet échantillon une énergie (E) qui est égale à l'énergie de séparation de deux spins (spin Up et spin Down) par l'action (B) (effet Zeeman) ; Cette énergie peut être portée par une onde électromagnétique via un circuit résonant.

Il est à noter que lorsque nous manipulons à des fréquences relativement élevées (>100Mhz), des précautions sont nécessaires sur la longueur des câbles à utiliser (si les câbles à utiliser sont longs, la théorie des lignes de transmission est nécessaire pour la conception de circuit résonant) ; Alors, comment définir cette longueur « L » ?

La longueur d'onde du signal qui se propage dans une ligne de transmission est donnée par :

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad \text{Eq (III-1)}$$

Avec :

C: est la célérité de la lumière,

F : est la fréquence du signal.

La théorie des lignes de transmission est appliquée lorsque les câbles sont électriquement longs c.-à-d que la longueur des câbles est supérieurs à un quart de la longueur d'onde de signal ($\lambda / 4$).

Dans la pratique nous considérons un câble électriquement long, lorsque sa longueur L soit :

$$L > \frac{1}{4} \frac{C}{f} V_F \quad \text{Eq (III-2)}$$

V_F : est le facteur de célérité du câble (généralement donné par le fabricant).

Par exemple : si la fréquence du signal désiré est de 200Mhz avec $V_F=0.5$; la longueur du câble minimale nécessaire sans recoure à la théorie des lignes de transmission est de 14 cm ; voir (figure III-6) : [45]

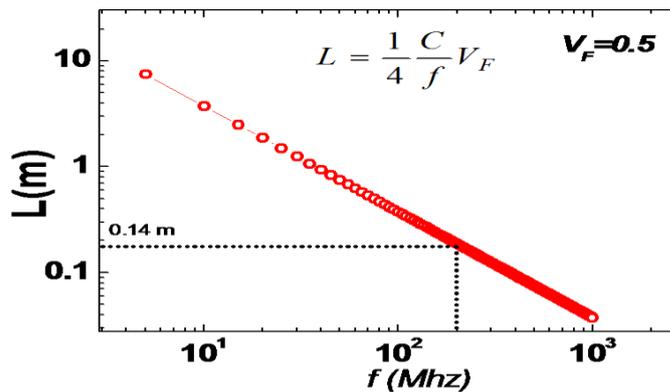


Figure (III-6) : la longueur électrique du câble en fonction de la fréquence [45]

Pour ne pas chevaucher la résonance avec celle de « zero field : résonance à B=0 » qui peut être large de 100 Gauss centré sur B = 0 [17] ; nous avons choisi une fréquence de 200Mhz.

Alors, notre résonance apparaîtra approximativement à 71.4 Gauss :

$$B(G) = 0.357234 * f(Mhz)$$

$$B(G) = 0.357234 * 200$$

$$B(G) = 71.4 Gauss$$

Notre circuit résonant est dimensionné à fonctionner à la fréquence de 200 MHz ; le circuit résonant utilisé dans ce travail est un circuit RLC série avec une capacité en parallèle pour adapter son impédance d'entrée à 50 Ω, (voir figure III-7).

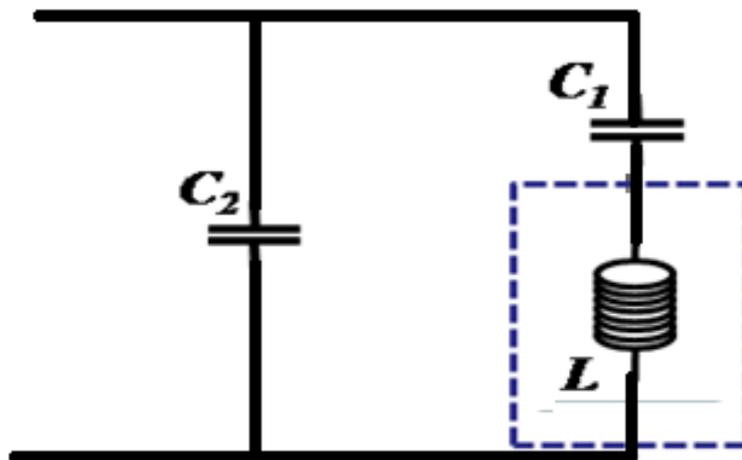


Figure (III-7). Schéma de l'oscillateur RLC. [45]

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

L'impédance d'entrée (Z) de notre circuit résonant est donnée par :

$$Z = \frac{-\frac{R}{\omega C_2} - j \left(R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C_1 \omega} \right) \left(\omega L - \frac{1}{\omega \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right)} \right) \right)}{\omega C_2 \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right)} \right) \right]} \quad \text{Eq (III-3)}$$

Pour adapter Z à 50Ω, nous avons à la résonance la partie réelle de Z doit égale à 50Ω :

$$\text{Re}\{Z\} = 50\Omega \quad \text{Eq (III-4)}$$

Et si on choisie $C_2 \gg C_1$, par approximation on peut facilement trouver :

$$\text{Re}\{Z\} = \frac{1}{R(C_2 \omega)^2} = 50\Omega \quad \text{Eq (III-5)}$$

D'où la capacité nécessaire pour l'adaptation peut être dimensionnée par :

La capacité C_1 peut être calculée comme suit :

$$C_2 = \frac{1}{\omega \sqrt{50R}} \quad \text{Eq (III-6)}$$

A la résonance la partie imaginaire de l'impédance est nulle.

$$\text{Im}\{Z\} = \omega^2 L + R\omega - \frac{1}{C_1} = 0 \quad \text{Eq (III-7)}$$

La résistance de notre résonateur est très faible (bobine de 100mm de diamètre avec 4 tour) ; alors $\omega L \gg R$.

Donc C_1 peut être calculé par :

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L} \quad \text{Eq (III-8)}$$

Notons que C_1 fixe la résonance de notre circuit et C_2 adapte l'impédance d'entrée à 50Ω ; l'inductance L peut être calculée par :

$$L = \mu \frac{N^2 A}{l} \quad \text{Eq (III-9)}$$

Avec :

N : est le nombre de spires ;

A : est la surface de la bobine ;

L : est la longueur du fil de la bobine.

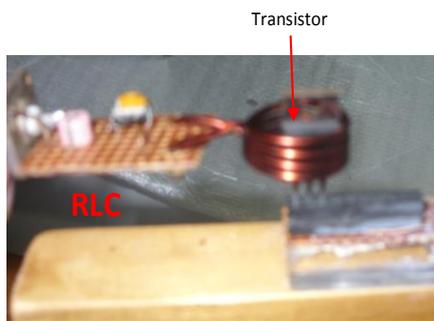
Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

Le champ magnétique généré par le circuit résonant doit être perpendiculaire à celui généré par les bobines d'Helmholtz B (pour éviter une éventuelle composante additionnelle au champ B).

Les dimensions géométriques de la bobine sont fixées par les échantillons caractérisés dans ce travail et qui sont, des transistors VDMOS commerciaux (IRF2110) [53] ; alors que la bobine comprend 4 tours pour couvrir complètement les transistors dans le but d'avoir un champ magnétique uniforme, avec un diamètre de 10mm, (voir figure III-8).

Le diamètre de fil utilisé est de 0.7 mm ; le tableau (III-2) donne les valeurs des capacités C_1 , C_2 , et l'inductance L, obtenues pour un circuit résonant à 200Mhz et que son impédance d'entrée est adapté à 50Ω .

Le circuit résonant est alimenté par une génératrice radiofréquence Agilent 8648D. [45]



a

Paramètre	Valeur
Inductance L	319 mH
Capacité C_1	1.8 pF
Capacité C_2	339 pF

b

Figure (III-8) :a) : résonateur réalisé b) : valeurs obtenus [45]

I-3-4-1-Test de circuit résonant :

Pour tester notre circuit résonant nous avons mesuré la réflexion S_{11} avec un analyseur de réseau (Agilent 8753ES) tel qu'il est montré par la figure (III-9 (a)). Le résultat est donné dans la figure (III-9(b)) ; une résonance à 200Mhz est observée :

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

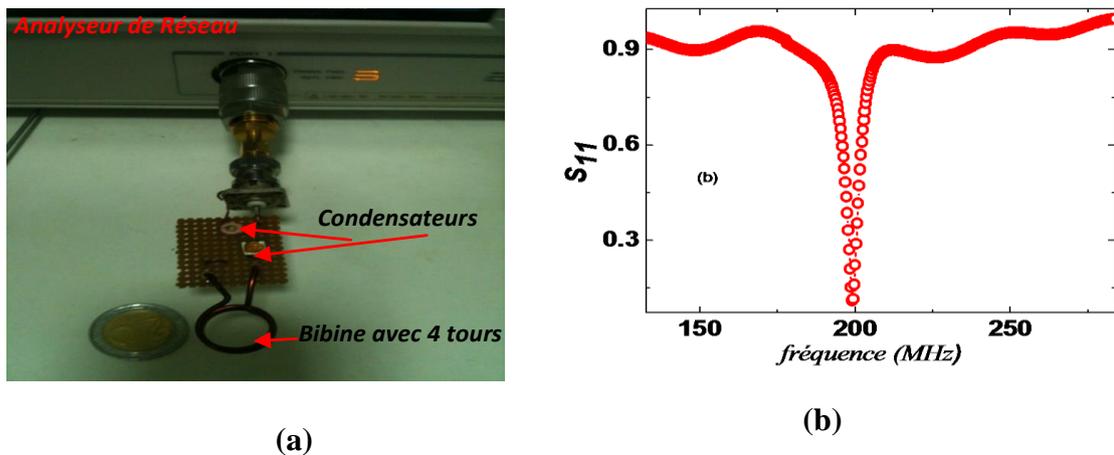


Figure (III-9) : (a) test de circuit résonant ; (b) résultat de réflexion S_{11} . [45]

I-3-5-Chaîne de conditionnement de signal EDMR :

Généralement, les courants mesurés dans les techniques EDMR sont de l'ordre de pico Ampère (pA), ce qui nécessite une amplification ; dans ce travail nous avons utilisé deux amplificateurs de courant à gain variable (DHPCA 100) [10]; monté en cascade, séparé par un filtre passe bas de fréquence de coupure de 10Khz.

Le gain de chaque amplificateur est de 10^2 à 10^8 ; ce qui offre une flexibilité de gain total (voir figure III-10).

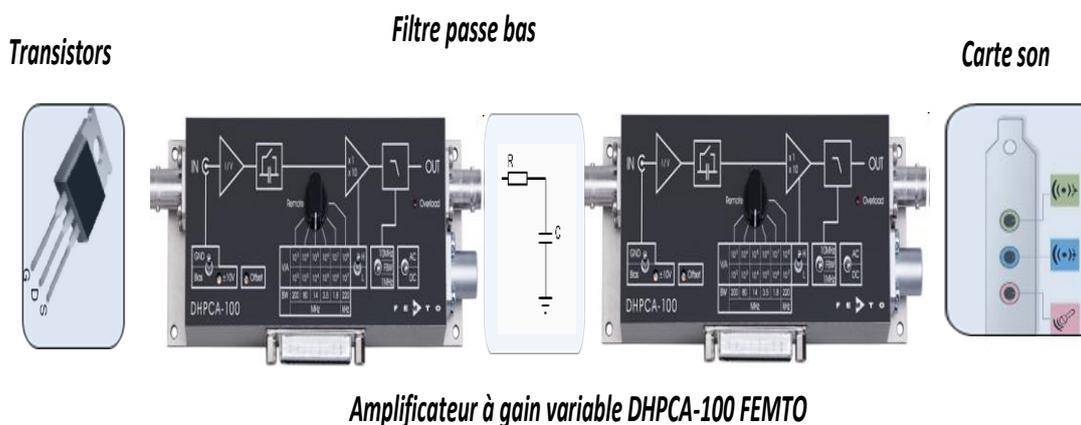


Figure (III-10) : chaîne d'acquisition de signal EDMR [45]

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

La résolution de notre Chaîne d'acquisition peut être calculée par (gain=10⁶) :

$$I = \frac{2}{2^{24}} * \frac{1}{gain} = 2(1.210^{-7}) * 10^{-7}$$
$$I = 2.410^{-14} A$$

Eq (III-10)

Ce qui est largement suffisant pour toutes les techniques EDMR (SDR, SDT et SDCP).

I-3-6-Amplificateur à détection synchrone (lock in amplifler) :

Le signal des techniques EDMR (courant) est noyé dans le bruit du montage et du dispositif (bruit thermique, bruit shot, bruit ficher et les interférences électromagnétiques) [50] ; nous disposons de plusieurs moyens permettant de détecter un signal noyé dans le bruit, telles les méthodes de filtrage, de moyen-âge, de corrélation et de démodulation synchrone (lock in amplifler) [48-52] ; dans ce travail, nous avons utilisé un amplificateur à démodulation synchrone virtuel implémenté sous LabVIEW .

La figure (III-11) donne le schéma synoptique de cette démodulation., le signal mesuré S(t) peut s'écrire :

$$S(t) = u(t) + b(t)$$

Eq (III-11)

μ (t) : Signal utile d'EDMR (due à l'application de signal modulé) peut s'écrire

$$u(t) = V_u \sin(2\pi f_m t + \phi_m)$$

Eq (III-12)

b(t) : bruit de mesure qui peut s'écrire comme une somme de sinusoïde de différente fréquence et amplitude :

$$\sum_n V_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n)$$

Eq (III-13)

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

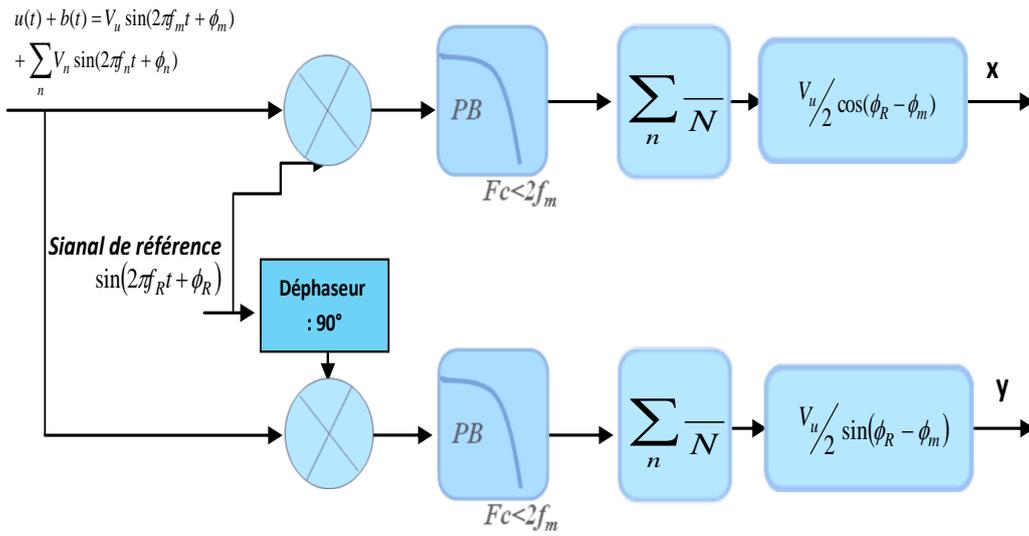


Figure (III-11) : diagramme de l'amplificateur à détection synchrone. [45]

Le signal EDMR peut être exprimé par :

$$S(t) = V_u \sin(2\pi f_m t + \phi_m) + \sum_n V_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \quad \text{Eq (III-14)}$$

Après le multiplieur, le signal est donné par :

$$S(t) * R_{ref}(t) = \left(V_u \sin(2\pi f_m t + \phi_m) + \sum_n V_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \right) * \sin(2\pi f_R t + \phi_R) \quad \text{Eq (III-15)}$$

Dans notre cas, la fréquence $f_m = f_R$

$$\begin{aligned} S(t) * R_{ref}(t) &= \frac{V_u}{2} \cos(\phi_R - \phi_m) \\ &+ \frac{V_u}{2} \cos(4\pi f_m t + \phi_R + \phi_m) \\ &+ \sum_n \frac{V_n}{2} \cos[2\pi(f_n \pm f_m) + \phi_R \pm \phi_n] \end{aligned} \quad \text{Eq (III-16)}$$

Après le filtre passe bas de fréquence de coupure $< 2f_m$ le deuxième terme est éliminé ainsi que les bruit de fréquence $< 2f_m$. ; En moyennant plusieurs mesures, nous pouvons éliminer le bruit :

$$x = \frac{V_u}{2} \cos(\phi_R - \phi_m) \quad \text{Eq (III-17)}$$

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

En faisant le même raisonnement, nous prouvons avoir (y) :

$$y = \frac{V_u}{2} \sin(\phi_R - \phi_m) \quad \text{Eq (III-18)}$$

D'où l'amplitude du signal EDMR est donnée :

$$\sqrt{y^2 + x^2} = \frac{V_u}{2} \quad \text{Eq (III-19)}$$

Et la phase est donnée par :

$$(\phi_R - \phi_m) = \text{Arc tan} \left(\frac{x}{y} \right) \quad \text{Eq (III-20)}$$

La figure (III-12) donne le diagramme de l'amplificateur à détection synchrone (lock in) implémenté sous LabVIEW.

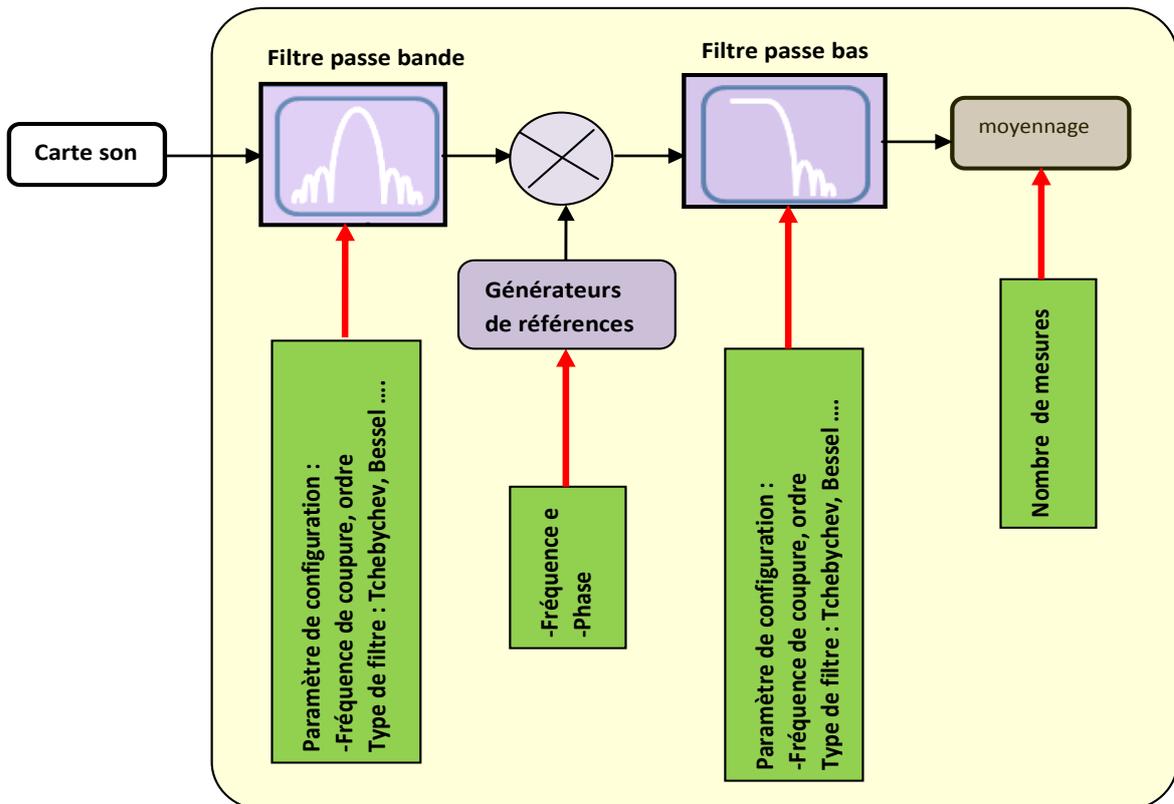


Figure (III-12) : diagramme du programme de l'amplificateur à détection synchrone implémenté sous LabVIEW. [45]

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

I-3-7-Logiciel de contrôle du spectromètre EDMR développé :

Le logiciel du spectromètre a pour but le contrôle et la configuration des différentes parties du spectromètre :

- Amplificateurs à détection synchrone (filtre, fréquence de référence ...) ;
- Rampe de champ magnétique statique ;
- Carte son (fréquence d'échantillonnage, nombre de bit ...) ;
- Sauvegarde et affichage des données de l'expérience.

La figure (III-13) donne le diagramme de programme de contrôle du spectromètre et la figure (III-14) présente l'interface graphique du programme de contrôle de spectromètre :

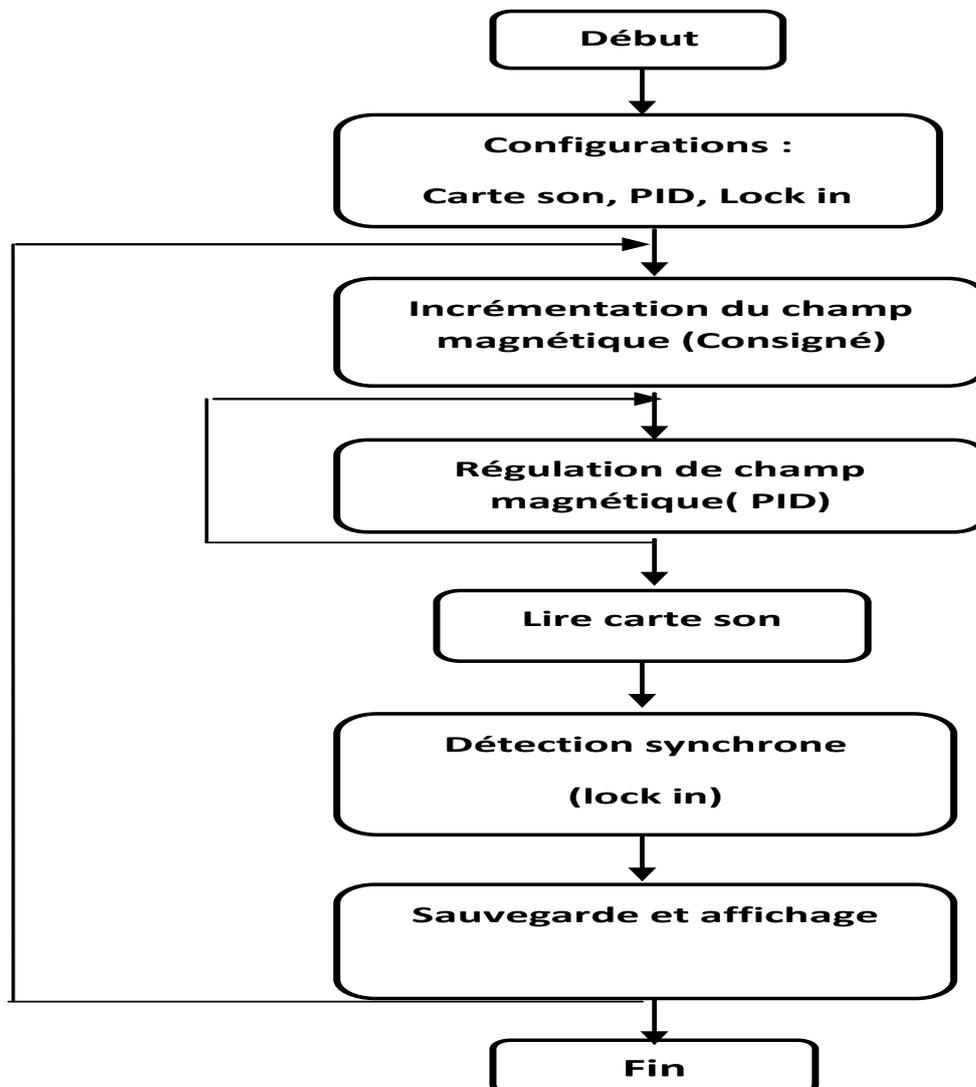
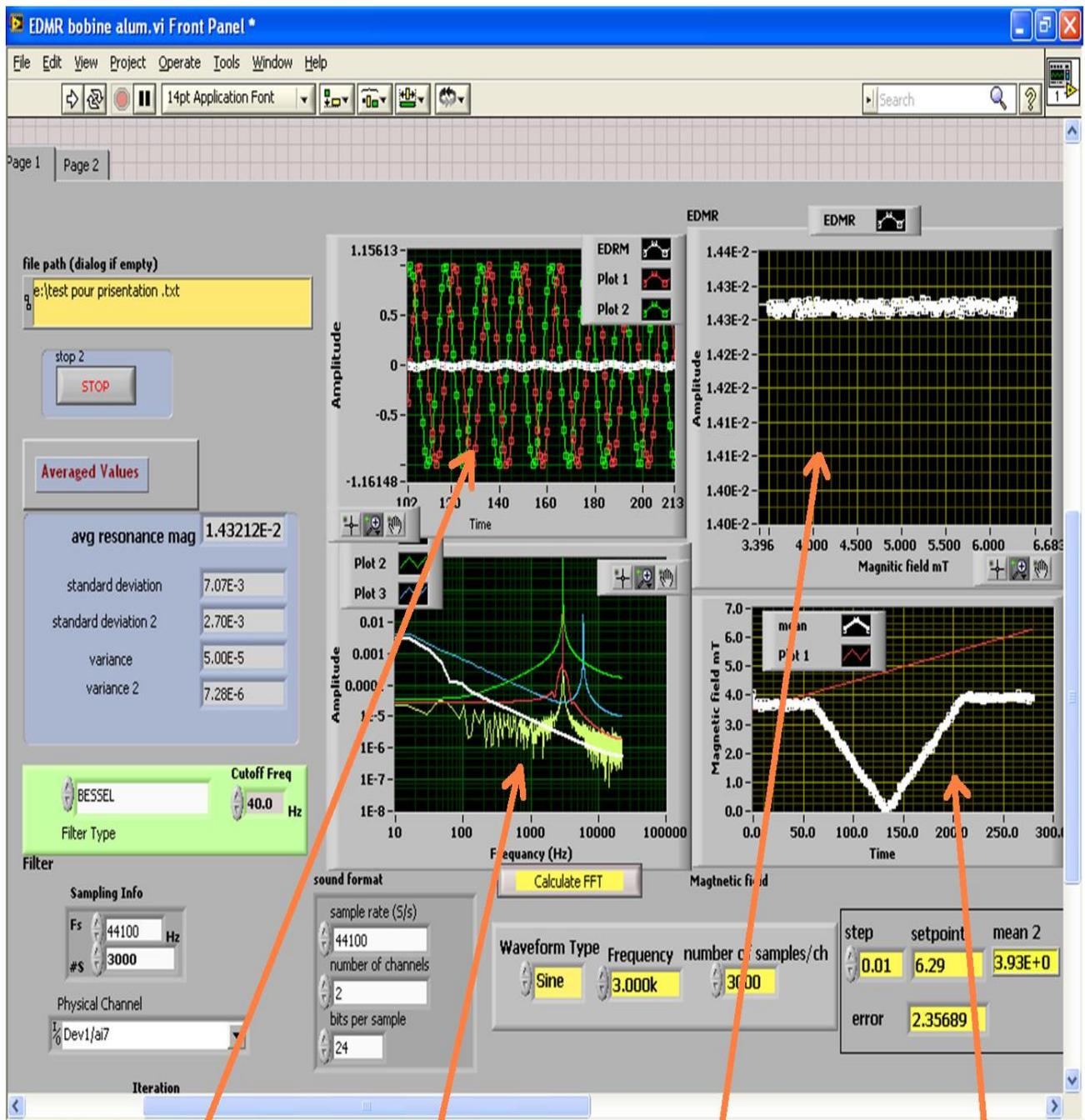


Figure (III-13) : diagramme de programme de contrôle du spectromètre développé. [45]

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ



signal EDMR modulé +
deux références sinusoidales

transformé de fourier FFT

signal EDMR

champ magnétique

Figure (III-14) : Interface du programme de contrôle de spectromètre

II-Motivation de ce travail :

II-1-introduction :

Le spectromètre décrit précédemment peut balayer un champ magnétique de « 0 à 200 gauss » ; Pour inclure la résonance au champ magnétique nul ($B=0$), il faut réaliser un circuit qui permet d'inverser le sens de courant dans la bobine pour obtenir un champ magnétique qui s'étend d'une valeur négative (-) à une valeur positive (+), le circuit qui permet de réaliser cet objectif est appelé « pont en H » (H bridge).

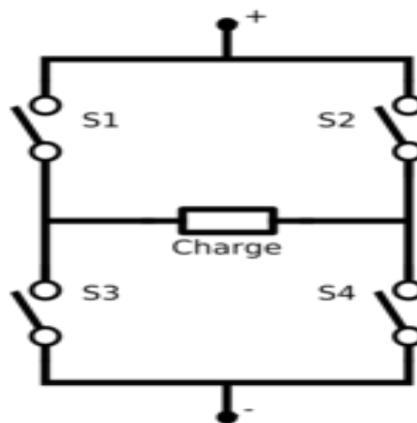


Figure (III-15) : schéma d'un pont en H

II-2-Principe de pont en H :

Le pont en H est une structure électronique servant à contrôler la polarité aux bornes d'un récepteur. Il est composé de quatre éléments de commutation généralement disposés schématiquement en une forme de H d'où le nom. Les commutateurs peuvent être des relais, des transistors (ce qui est le cas de notre travail), ou autres éléments de commutation en fonction de l'application visée.

Il permet donc dans notre cas d'inverser le sens du courant dans la bobine Helmholtz qui est représenté dans la (figure III-2-a)

Cette structure se retrouve dans plusieurs applications de l'électronique de puissance incluant le contrôle des moteurs, les convertisseurs et hacheurs, mais aussi les onduleurs. Il se présente sous différentes formes passant par les circuits intégrés pour les applications de faibles et

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

moyennes puissances, les circuits discrets mais aussi les modules intégrés pour les moyennes et hautes puissances.

Les transistors MOS sont mieux adaptés pour l'utilisation d'un pont en H.

- ❖ Leur chute de tension à leur borne est plus faible, leur commutation est plus rapide et le courant supporté par le transistor est plus important.
- ❖ Leur résistance résiduelle lorsqu'ils sont saturés est assez faible et limite donc la puissance dissipée.

Dans notre travail nous allons utiliser des MOSFETs de puissance à canal N pour les transistors inclus dans le pont en H réalisé, A l'activation les commutateurs de différentes combinaisons

pour obtenir le branchement voulu. Le tableau suivant résume les combinaisons permises (voire la Figure III-16). L'ensemble des combinaisons qui ne figurent pas dans le tableau sont interdites et créent un court-circuit de la source. Le courant de référence pour la charge est reconnu comme étant de gauche à droite.

S1	S2	S3	S4	Résultat
X	X	X	X	Aucune tension aux limites de la charge.
✓	X	X	✓	Courant positif à travers la charge.
X	✓	✓	X	Courant négatif à travers la charge.
✓	✓	X	X	Charge court-circuitée.
X	X	✓	✓	Charge court-circuitée.

Tableaux (III-2) : les Combinaisons permise de pont H

II-2-1 Le MOSFET DRIVER IR2110 :

Dans de nombreuses applications, un circuit flottant est requis pour piloter le MOSFET côté supérieur d'un pont en H. Dans notre travail, deux MOSFET sont utilisés comme MOSFET côté haut et deux MOSFET sont utilisés comme MOSFET côté bas. Le IR2110 des redresseurs internationaux peut être utilisé comme pilote MOSFET côté haut et côté bas. Il a un circuit flottant pour gérer l'opération bootstrap. Le IR2210 peut avec tension de support jusqu'à 500v (tension de décalage). Ses broches de sortie peuvent fournir un courant maximal jusqu'à 2 ampères. Il peut également être utilisé comme pilote IGBT. Le circuit flottant IR2210 peut piloter le MOSFET côté haute jusqu'à 500 volts

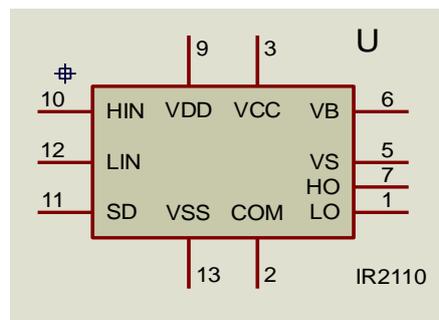


Figure (III-16) : schéma descriptif de IR2110 [48]

La configuration des broches et la fonctionnalité de chaque broche sont indiquées ci-dessous :

- ❖ La broche 1 (LO) est : la basse tension de sortie latéral.
- ❖ La broche 2 (COM) est : un chemin de retour pour le côté bas.
- ❖ La broche 3 (VCC) est : la basse tension alimentation fixe
- ❖ La broche 5 (VS) est : la tension de décalage d'alimentation logique
- ❖ La broche 6 (VB) est utilisée comme alimentation flottante élevé ou circuit flottant pour fournir une tension flottante au MOSFET côté supérieur.
- ❖ La broche 7 (HO) est flottante sortie élevé
- ❖ La broche 9 (VDD) : est la tension d'alimentation logique.
- ❖ La broche 10 (HIN) est un signal d'entrée pour la sortie du haut-parleur latéral.
- ❖ La broche 11 (SD) est utilisée comme broche d'arrêt.
- ❖ La broche 12 (LIN) est un signal d'entrée pour la sortie du pilote MOSFET côté bas.

II-2-2-Fonctionnement de pont H commandé par IR2110

Lorsque sur la sortie HO-1 du U1 est présent un niveau logique 1 et sur sa sortie opposée LO-1 est présent un niveau logique 0. Comme le second U2 lorsque sur sa sortie HO-2 est présent un niveau logique 0, sur sa sortie opposée LO-2 est présent un niveau logique 1, Dans le cas contraire lorsque la sortie de U1 est présent un niveau logique 0 et sur sa sortie opposée LO-1 est présent un niveau logique, (voire la figure III-17) :

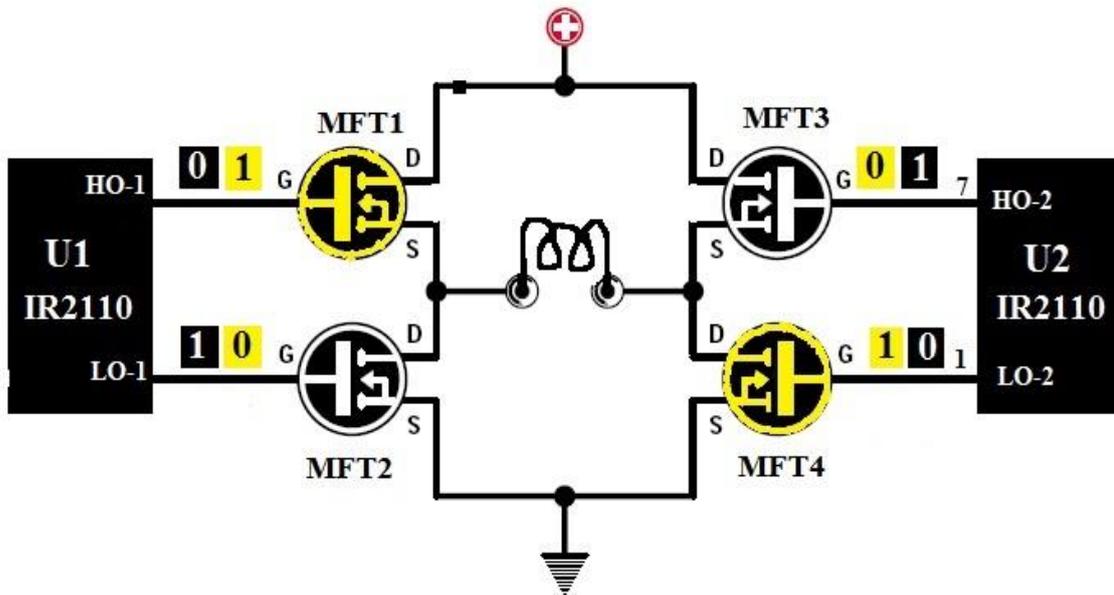


Figure (III-17) : un pont en H commandé par ir2110

Nous allons avoir donc deux sens de courant :

- ❖ Sens 1 : un courant commandé par U1 qui circule dans un sens négatif qui passe de traversant les transistors MTF1 et MTF4.
- ❖ Sens2 : un courant positif commandé par U2 qui traverse respectivement les deux transistors MTF3 et MTF2.

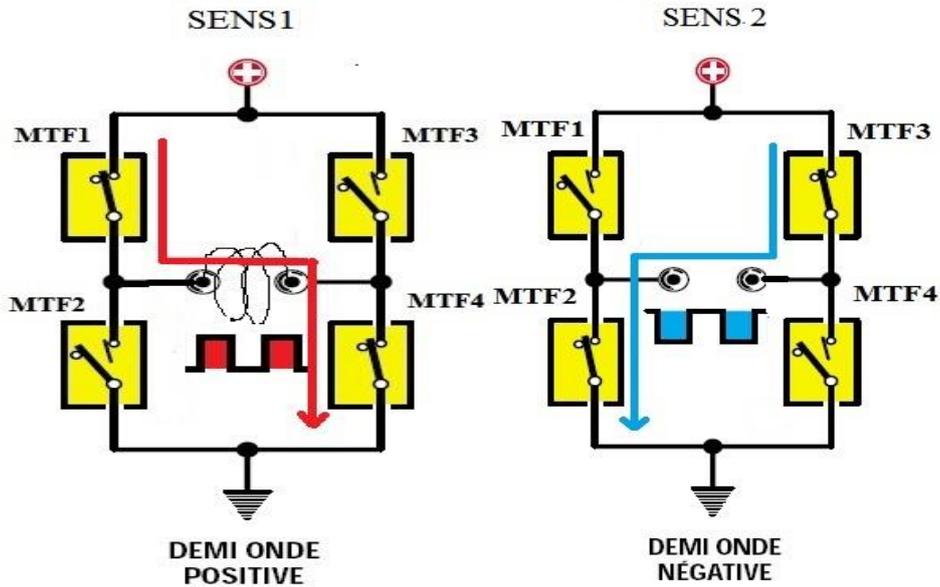


Figure (III-18) : les sens de circulation de courant dans le pont en H

II-3-Realisation pratique du pont en H :

Le pont en H que nous allons réaliser inclut des transistors de puissance VDMOSFET (IRF840)

II-3-1-Le transistor MOSFET de puissance :

Le transistor VDMOSFET (Vertical Double-diffused Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor) est le composant le plus utilisé actuellement dans le domaine de l'électronique de puissance, vu la simplicité de son fonctionnement ainsi que ses bonnes performances. Les transistors les plus utilisés sont généralement du canal N, du fait d'une mobilité plus importante des électrons par rapport aux trous [59]. Les dispositifs qu'on a utilisés dans ce travail sont les transistors commerciaux VDMOSFET IRF840 (voire la figure III-19-a), Notamment, nous allons inclure une aperçue générale sur la structure interne de VDMOSFET à l'échelle microscopique (voire la figure III-14-b)

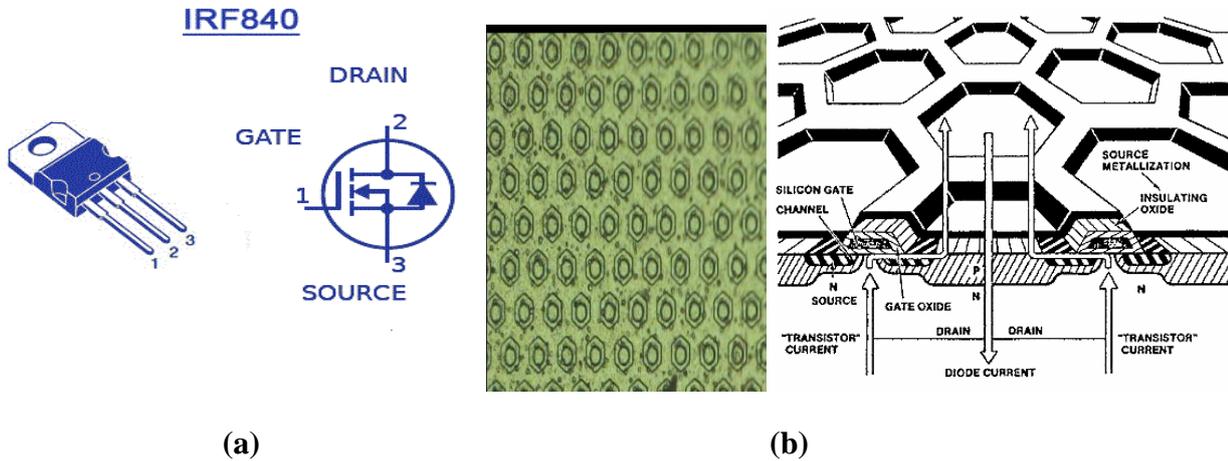


Figure (III-19) : (a) transistor de puissance IRF840, (b) structure microscopique. [33,49]

II-3-2-Structure de base du transistor VDMOSFET :

Le VDMOSFET (Vertical **D**ouble diffusé **MOS**) a une structure proche mais déferent de celle d'un transistor MOS latéral. Notamment, la structure de VDMSFET est verticale : l'électrode grille métallique est électriquement isolé de substrat par une couche isolante de dioxyde de silicium (SiO_2), l'électrode source est placé sur le drain qui est situé sous le composant ce qui nous donne un courant vertical entre ces deux zones de conduction fortement dopées sont diffusées opposées au substrat, la fabrication d'une telle structure repose sur le processus de double diffusion (voire la figure III-20). [33]

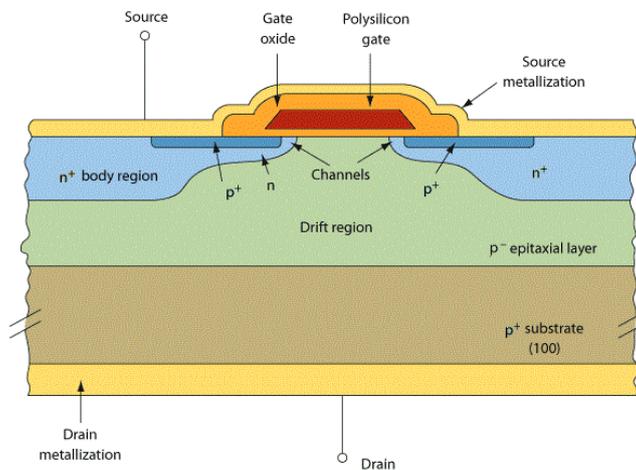


Figure (III-20) : Schéma illustratif d'un VDMOSFET. [33]

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

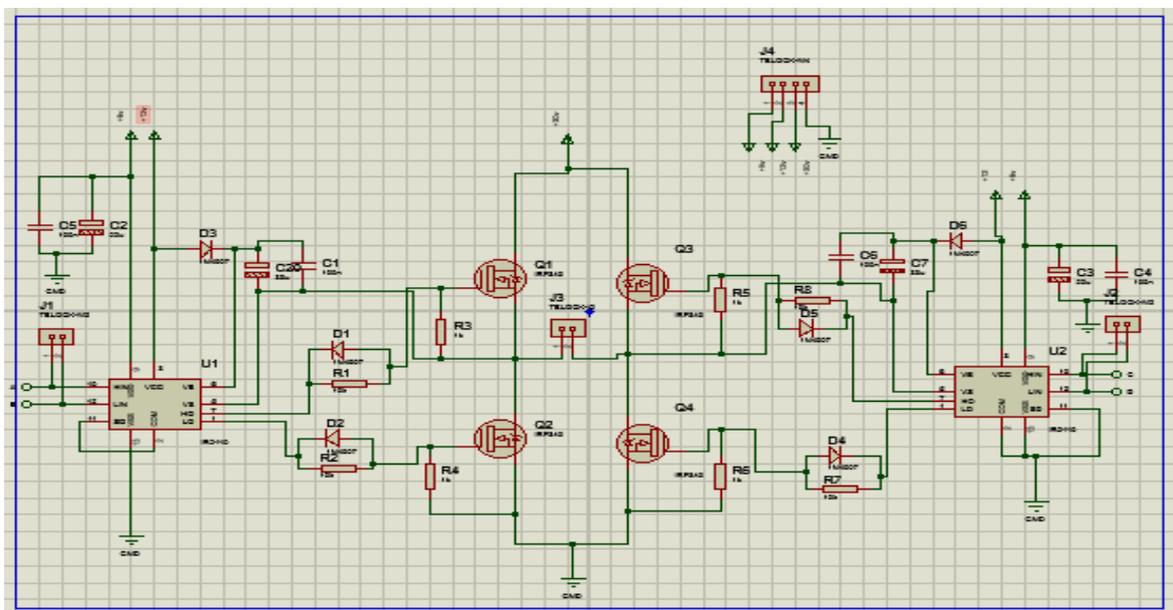
II-3-3-étape de la réalisation pratique de la carte :

Pour la réalisation des circuits électrique et le développement du circuit imprimé on a utilisé le logiciel « PROTEUS » et en suit les étapes ces dessus :

- Pour créer le circuit électronique on a utilisé « ISIS » qui est fait spécialement pour cette tâche ainsi que pour la simulation du circuit.
- L'étape qui suit consiste à nommer les composants utilisés, avec les empreintes de ces composants ainsi que les valeurs appropriées.
- La dernière étape est les transformations de schéma électrique en circuit imprimé PCB sur « ARES » qui permette a faire le dessin du circuit PCB ou le transfert du circuit électrique en PCB. et à la fin en choisit les dimensions du PCB (les bords) et l'épaisseur des pistes de routage ainsi que les pastilles.

II-3-3-1- Simulation du circuit avant sa réalisation :

Avant de passer à la réalisation pratique de notre système nous avons eu recours à la simulation des différentes parties du dispositif. Pour cela on a utilisé le logiciel ISIS qui est un très bon logiciel de simulation en électronique.



Figure(III-21) : circuit électrique de simulation

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

II-3-3-2 création et réalisation du circuit imprimé :

Tous les composants se dotent d'un package doivent être vérifiés pour le circuit imprimé et nous sommes appelés à créer leur packages s'il n'existe pas.

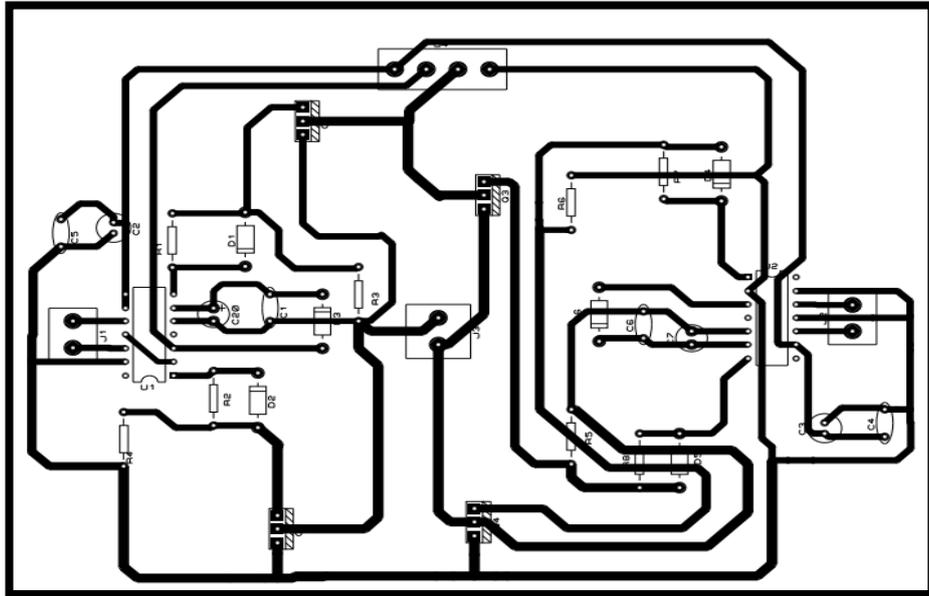


Figure (III-22) : Les composants et les pistes du circuit imprimé

Le circuit imprimé est réalisé en respectant la distance entre les pistes et les pastilles qui sont en fonction des dimensions des composants utilisés dans la réalisation

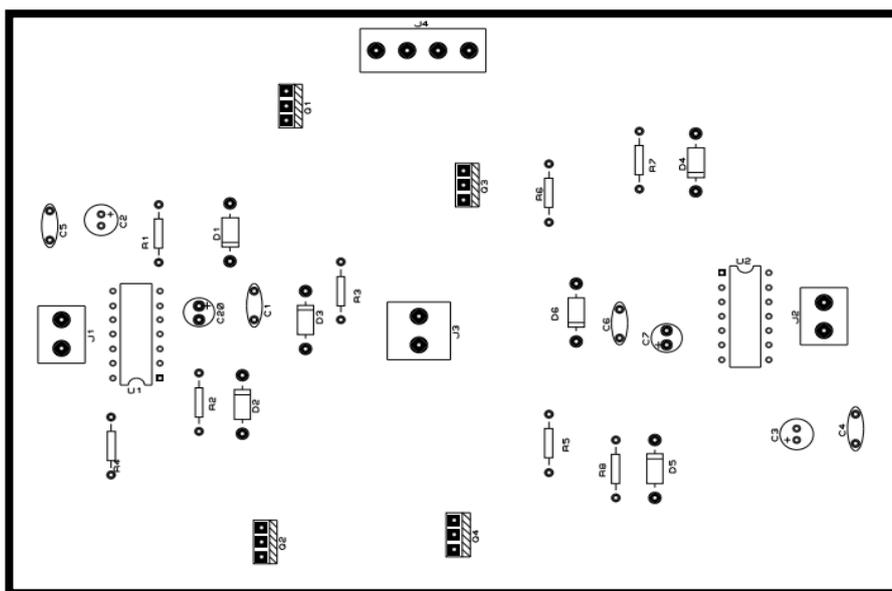


Figure (III-23) : Le circuit imprimé de la réalisation coté composant.

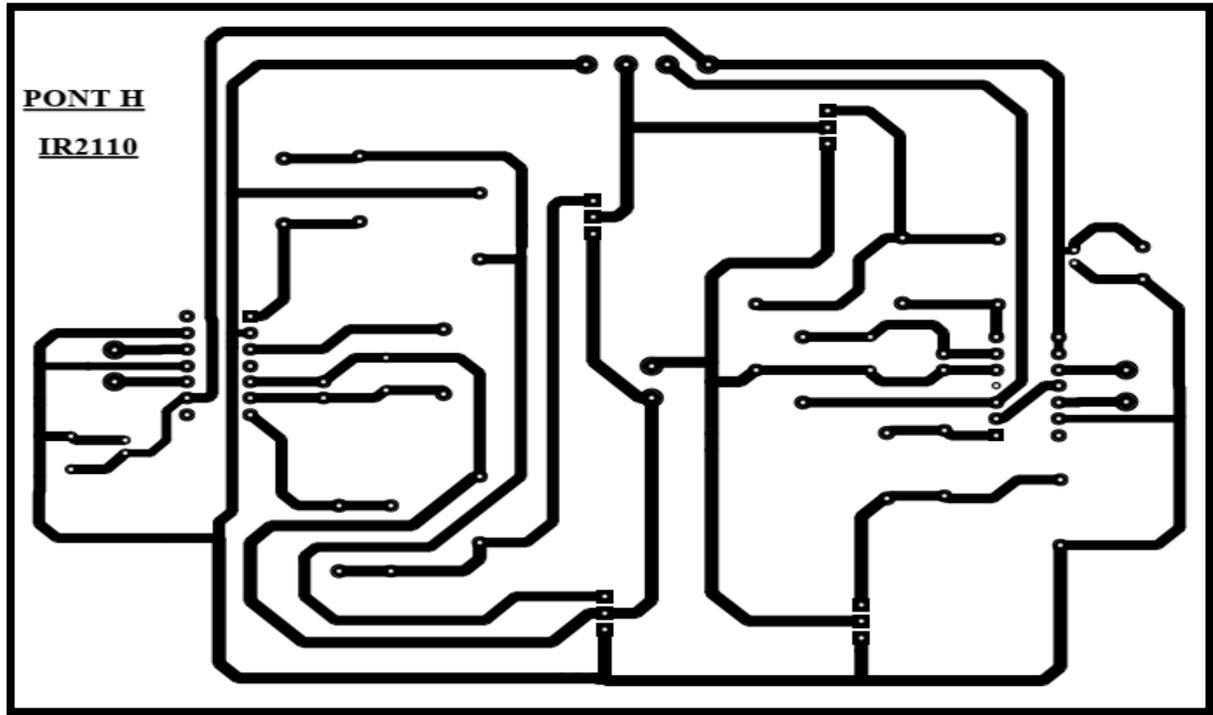


Figure (III-24) : le Circuit imprimé pour la réalisation

II-3-3-3 développement de la maquette :

Après avoir finis les étapes précédentes, on passe alors à la dernière étape qui est le développement de la maquette et cela en respectant les étapes suivantes :

- ❖ **L'insolation** : on retire la pellicule protectrice de la plaquette pré sensibilisée. Le typon est placé sur la plaque pré sensibilisée au contact de la résine photosensible. L'ensemble est placé dans une insoleuse pour une exposition pendant quelques minutes à une lumière ultraviolette.
- ❖ **La révélation** : après l'insolation on plonge la maquette dans un bac contenant du révélateur. Les zone de résine fragilisées par la lumière ultraviolette sont détruite.
- ❖ **La gravure** : le cuivre non protégé est éliminé par une solution de perchlorure de fer chauffé. Qui va dissoudre les parties de la couche de cuivre non protégées par la résine.

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

Une fois la gravure est éliminée, les restes de résine qui recouvre les pistes de cuivre sont éliminées avec de l'alcool.

II-3-3-4-Implémentation des composants sur la carte :

Après toutes les étapes précédentes, le circuit imprimé est prêt pour le perçage. Toutes les connexions seront percées à l'aide d'une perceuse munie d'un foret de 0.8mm de diamètre. Certains trous nécessitent un grandissement pour s'adapter au composant les plus volumineux. Pour l'implantations des composants, nous commençants par les moyen pour terminer des grands, puis nous allons souder les composants passifs : résistances, capacité en assurant que composants polarisés soient bien orientés et qu'ils soient de même hauteur après les support des circuits intégrés, puis on termine par les semi-conducteur et les composants les plus volumineux (diodes, transistors, microcontrôleuretc.)

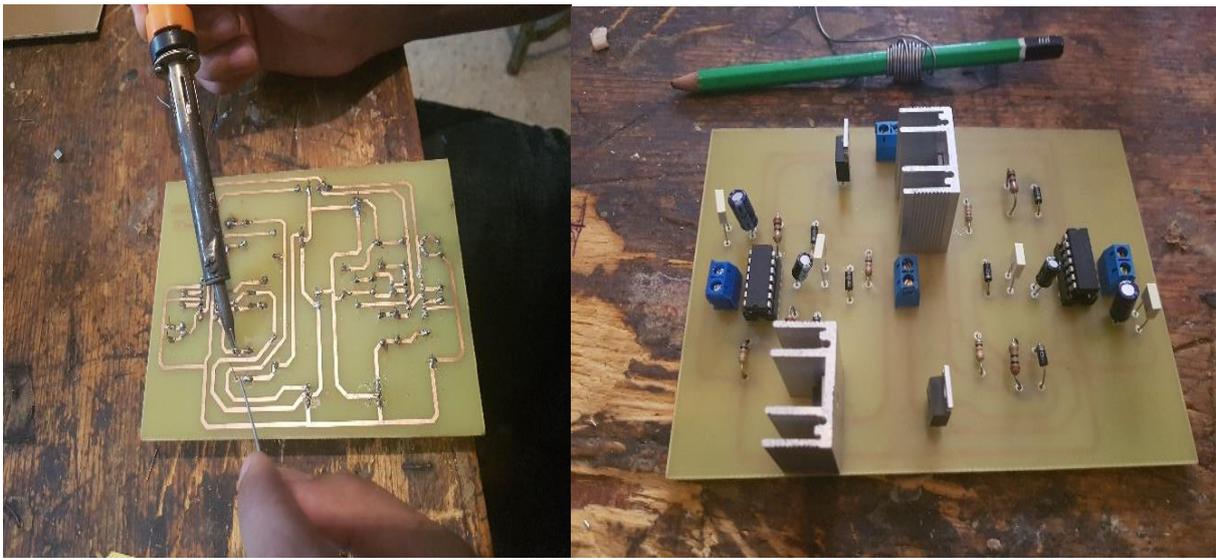


Figure (III-25) : Implantation des composant sur la maquette

Après avoir terminé le câblage, on vérifie qu'il n'a pas de soudure oubliée, ensuite on vérifie une dernière fois l'orientation des diodes, capacités et transistors et finalement on met sous tension afin de vérifier la présence de la tension d'alimentation.

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

II-3-3-5 Liste des composants utilisés et leurs nomenclateurs :

Résistances :

- * "R1", "R2", "R7", "R8" : 10R
- * "R3", "R4", "R5", "R6" : 1k

Condensateurs :

Non polarisé :

- * "C1", "C4", "C5", "C6" : 100nF / 12V

Polarisé :

- * "C2", "C3" : 22uF / 25V
- * "C7", "C20" : 33uF / 25V,

Circuits intégrés :

- * "U1", IR2110 / "U2", IR2110,

Transistors :

- * "Q1", "Q2", "Q3", "Q4" : IRF840,

Diodes,

- * "D1", "D2", "D3", "D4", "D5", "D6" : 1N4007,

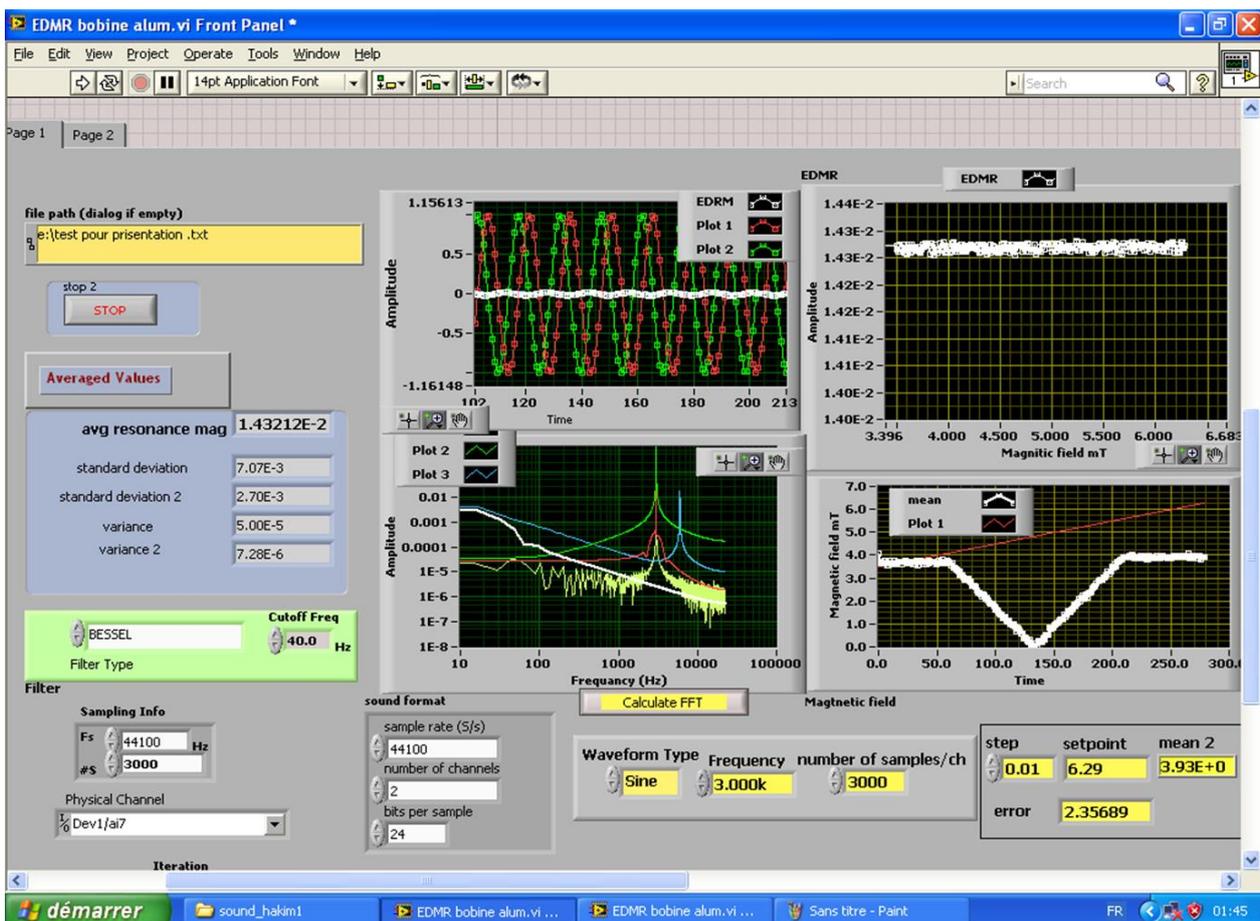
Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

II-3-Teste de pont en H :

II-3-1- Interface de labVIEW :

Le pont en H réalisé précédemment vas être intégré dans le spectromètre pour balayer un champ magnétique d'une valeur qui négative a une valeur positive, représenter par des courbe signaux modulé en valeurs absolus, La figure (III-26) ci-dessus nous montre l'interface graphique de l'application de contrôle du spectromètre réalisé par LabVIEW qui vas nous permettre de visualiser les signaux suivants :

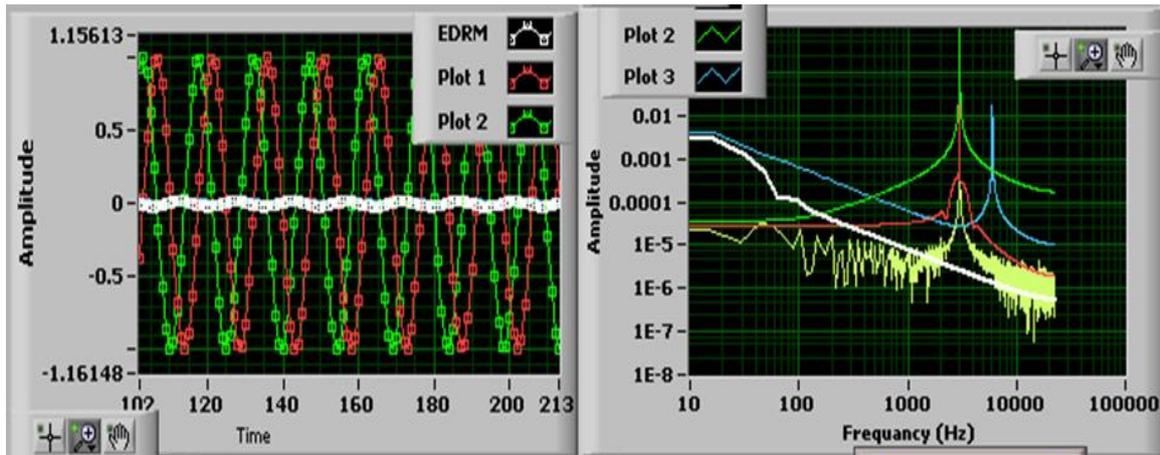
- ❖ Le signal EDMR.
- ❖ Le signal EDMR modulé avec deux références sinusoïdales.
- ❖ La transformé de fourrier FFT de signal modulé.
- ❖ La courbe de champs magnétique balayé entre -40mT et +40mT



Figure(III-26) : L'interface graphique de programme LabVIEW.

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

Avant de commencer les mesures il faut d'abord régler le champ magnétique dans le gaussmètre à (0 mT). Le signal de sortie est réglé de (0 à 40 mT). la figure (III-27) reflète les différents signaux à la sortie de la détection synchrone virtuelle (lock in), le signal blanc indique notre signal EDMR et pour les deux signaux le rouge et le vert sont des signaux de référence sous forme sinusoïdale décalé. Cette dernière est la transformée de Fourier de signaux précédant à une fréquence de 1KHz.



(a)

(b)

Figure (III-27) : (a) les différents signaux à l'entrée (b) la transformée de Fourier de signal précédant.

Dans la figure (III-28) le signal blanc représente le signal EDMR qui suit une consigne en couleur rouge, elle nous donne notre signal final qui est sous forme de courbe de champ magnétique en fonction de temps allant de (-40 a 40 mT)

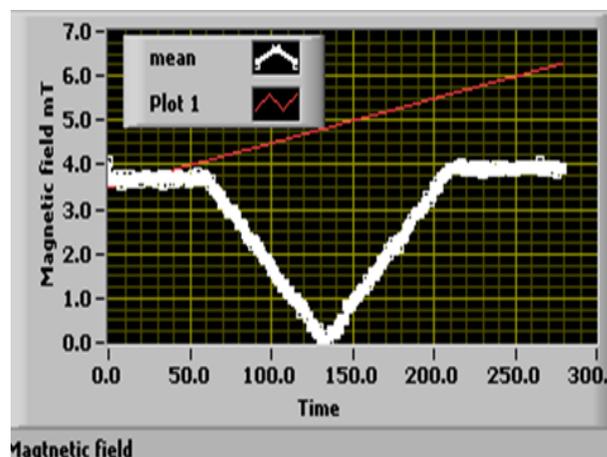


Figure (III-28) :le signal EDMR final

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

II-3-2-Interprétation des résultats :

Le teste du pont en H pour plusieurs balayages montre la prolongation de champ magnétique générer par la bobine Helmholtz, par conséquent nous allons avoir une courbe qui s'étend (de -40 jusqu'à 40 mt) en valeurs absolus, ainsi l'accomplissement du l'objectif fixé dans notre travail (voire la figure III-27)

Pour avoir un bon signal bien présenté il faudra diminuer le maximum de bruit extérieur et intérieur pour ne pas avoir un signal noyer dans les bruits, et la qualité du matériel ainsi que les branchements qui sont très importants pour avoir un bon signal résonant.

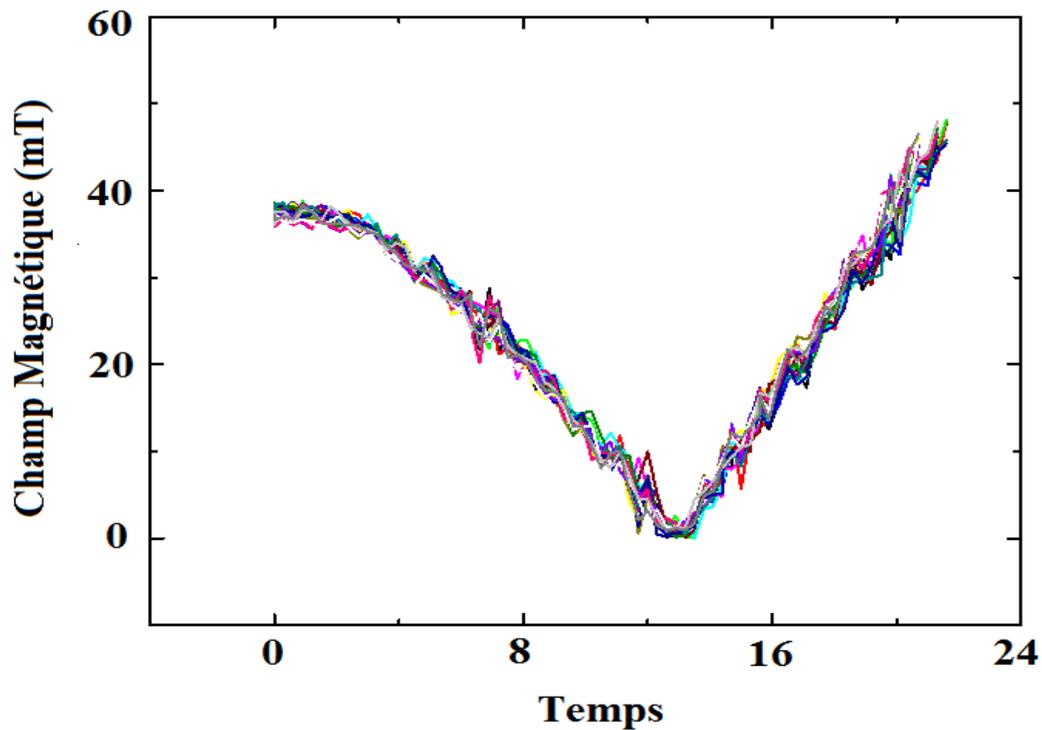


Figure (III-29) : la courbe cumulative de champ magnétique en fonction de temps en valeurs absolues

Chapitre III : description du dispositif VDMOSFET utilisé et le spectromètre EDMR à faible champ

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons opté à intégrer un pont en H au spectromètre EDMR réalisé au sein de CDTA, Pour cela nous avons présenté les différentes constitutions de spectromètre utilisé dans ce travail, Ainsi nous avons présenté le principe et les différentes étapes de réalisation de pont en H avec à base de transistor VDMOS et un circuit de commande IR2110. Après avoir testé le pont en H nous avons obtenus une courbe de champs magnétiques balayés de (-40 a +40mT).

Conclusion Générale

Conclusion général

Depuis la découverte de la spectrométrie EDMR, cette dernière s'est rapidement développée et a été appliquée dans de nombreux domaines de recherche pour l'identification des défauts atomique et l'étude de la structure des centres des pièges dans les matériaux.

L'identification des microstructures des défauts dans Si-Sio₂ et très importante pour comprendre les mécanismes responsables de la dégradation des transistors, une fois ces mécanismes sont connues, elle nous permet d'agir sur la procédure de fabrication pour diminues ces défauts

Notre travail consiste a intégré un pont en H au spectromètre EDMR réalisé en sein de CDTA, après avoir réalisé et testé ce pont H nous sommes arrivés à obtenir des signaux EDMR et la courbe de champ magnétique balayé de « -40 à +40 mT », les signaux que nous avons obtenus sont reproductible malgré qu'a plusieurs reprise nous avons due rebranché tous les blocs de system et refaire le réglage des paramètres.

Références Bibliographique

Références Bibliographiques

- [1] : Xiang –Lei Han, 2011, thèse, micro et nanotechnologies, Acoustique et télécommunication, l'université de Lille 1 sciences et technologies, réalisation et caractérisation de dispositif MOSFET nanométrique à base de réseaux dense de nano fils verticaux en silicium, 165p.
- [2] : ARIB, B, 18-7-2016, mémoire, génie microélectronique, faculté MOULOU Mammeri, Tizi-Ouzou, la technologie SOI (Silicon On Insulator) « SOI DG MOSFET », 62p
- [3] : MEDDAH, K, Identification de la microstructure des pièges dans les dispositifs MOS par la technique SDPC, mémoire pour obtention de diplôme master en physique, juin 2017
- [4] : CHABBI, T, Etude en fiabilité du transistor MOS SOI, Mémoire fin d'étude master académique 2014, 62p
- [5] : Mark, A, anderson PM (2013) NBT and spine dependent charge pempping, state university
- [6] : KEBIB A, janvier 2013, mémoire de magister, microélectronique, étude et simulations d'un transistor MOS vertical, 139p.
- [7] : : Guerfi, Y, 13 Oct 2016, thèse, réalisation et caractérisation de transistors mos à base de nano fils verticaux en silicium, 165p.
- [8] : Mickael DENAIS « étude des phénomènes de dégradation de type négative bias température instability (nbt) dans les transistors Mos submicroniques des filières CMOS avancées »L'université de Provence d'Aix-Marseille I soutenue publiquement le 09 septembre 2005.
- [9] : OLIVIER WEBER « étude, fabrication et propriété de transport de transistors CMOS associant un Diélectrique Haute Permittivité et un Canal de Conduction Haute Mobilité »L'institut national des sciences appliquées de Lyon, Soutenue le 14 décembre 2005 .
- [10] : BEN AKKEZ I, 20 décembre 2012, thèse, nano électronique et nano technologies, études théorique et expérimentale des performances des dispositifs FD SOI sub 32 nm, 170p.
- [11] : S.M. SZE «Physics of semiconductor devices", J. Wiley & Sons, p. 365, 1981
- [12]: R L RUDNICK (dir) et S.GUO, geochemistry .VOL 3: The grust Elsevier 2005 compotion of the continental grust p 48-13.
- [13] : BOUMEDINE, F, Modélisation des caractéristiques statiques courant-tension des structures métal-oxyde-semiconducteur (MOS)
- [14] : Antonin Grandfond, 16 décembre 2014, Thèse, spécialité électronique, micro et nanoélectronique, optique et laser, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, Étude de

Références Bibliographiques

la fiabilité des mesures électriques par la microscopie à force atomique sur couches diélectriques ultra-minces développement d'une technique de pompage de charge résolue spatialement pour la caractérisation des défauts d'interface, 179p.

[15] : Madani H, 2012/2013, mémoire de magistère, génie électrique et électrotechnique, option : informatique, faculté hydrocarbure et de la chimie, université m'hamed bougara boumerdes , caractérisation de l'effet d'irradiation sur les transistors LDD MOSFET par des méthodes basées sur le pompage de charges , 103p .

[16]: CHENAF T, 0/04/2016, magister, Microélectronique IC Design, université Batna 2, étude des défauts d'interface Si/SiO₂ dans les TMOS : Simulation sous Silvaco et modélisation, 76p.

[17]: Marion CARMONA, 4 mars 2015, Thèse, spécialité micro et nanoélectronique, Fiabilité des transistors MOS des technologies à mémoires non volatiles embarquées, 176p.

[18]: Yoann MAMY RANDRIAMIHAJA, 2 Novembre 2012, thèse, école doctorale : sciences pour l'ingénieur mécanique, physique spécialité : micro et nano électronique, l'université d'Aix-Marseille et sud Toulon-var, étude de la fiabilité des technologies CMOS avancées, depuis la création des défauts jusqu'à la dégradation des transistors 184p

[19] : Jan Behrands, 11 November 2009, thèse de doctorat, Spin-dependant Transport and Recombination in Solar Cells studied by Pulsed Electrically Detected Magnetic Resonance, Institut für Experimentalphysik der Freien Universität Berlin, 181p.

[20] : Hoehne Felix, 2012, thèse de doctorat, Electrical Detection of Hyperfine Interactions in Silicon, Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Physik der Technischen Universität, 203p.

[21] : Denis Royer, livre, Imagerie par résonance Magnétique et Sclérose en Plaques, 17p.

[22] : Boudjerda Mounir, 25/06/2012, thèse de magistère, Etude d'un isolateur coplanaire en bande X pour des applications télécoms, Université Ferhat Abbas-Sétif -UFAS, 134p.

[23] : Djerfaf Fatima, 27/06/2012, thèse de doctorat, caractérisation large bande diélectrique et magnétique de couches minces et de substrats, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SÉTIF-UFAS (ALGERIE), 193p

[24] : Duin.E, livre, Electron Paramagnetic resonance theory.

[25] : Emmanuel Maes, livre, la résonance magnétique nucléaire, Université des Sciences et Technologies de Lille F-59655 Villeneuve d'Ascq, 75p.

Références Bibliographiques

[26] : Turek Phillipe, Spectroscopie de résonance paramagnétique électronique, Université de Strasbourg, 48p.

[27] : Romdhana Hallouma, 30/01/2012, thèse de mastère, Effets des Rayonnements Ionisants sur le Polyéthylène, Application pour les mesures des doses élevées, Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, 92p.

[28] : P.Molinié, 2001, La résonance paramagnétique électronique moderne : Acrobatie de Spin, Institut des Matériaux Jean Rouxel.

[29] : Tahanout Cherifa, 2015, Implémentation d'une plateforme de caractérisation sous champ magnétique et de la spectroscopie EDMR (Electrically Detected Magnetic resonance)

[30] : Brad C. Bittel, 2012, Study of defect structure and electrical transport in back end of line dielectrics ans sic mosfets, The Pennsylvania State University, 148p.

[31] : SELLAMI M, thèse, composants électroniques, simulation de la technique de pompage de charge à trois niveaux pour la modélisation des défauts à l'interface des TMOS submicroniques, 95p.

[32] : BIRAHIM , DIAGNE , 16 novembre 2007 , thèse , microélectronique , université louis pasteur , étude et modélisation compact d'u transistor MOS SOI double – grille dédiée a la conception , 213p .

[33] : Yves MANEGLIA, 18/12/1998, thèse de doctorat, ANALYSE EN PROFONDEUR DES DEFAUTS DE L'INTERFACE Si-SiO₂ PAR LA TECHNIQUE DU POMPAGE DE

[34] : Jacob J. Follman, 2013, thèse de master, ON THE ATOMIC SCALE DEFECTS INVOLVED IN THE NEGATIVE BIAS TEMPERATURE INSTABILITY IN 4H-SiC MOSFETs, The Pennsylvania State University, 70p.

[35] : Jason P. Campbell, 2007, thèse de doctorat, ATOMIC-SCALE DEFECTS INVOLVED IN THE NEGATIVE BIAS TEMPERATURE INSTABILITY IN SiO₂ AND PLASMA-NITRIDED OXIDE BASED pMOSFETs, The Pennsylvania State University, 134p.

[36] : Jean-Marc Nuzillard, 03/02/2012, Introduction à la résonance magnétique nucléaire des liquides, Institut de Chimie Moléculaire de Reims. Université de Reims–Champagne–Ardenne, 226p.

[37] : A. Jander, P. Dhagat, "Sensitivity analysis of magnetic field sensors utilizing spin-dependent recombination in silicon diodes," solide-state electronics, vol.54, no.11, pp.1479-1484, Nov 2010

Références Bibliographiques

- [38] : F.A. Castro, G.B. Silva, L.F. Santos, R.M. Faria, F. Nuesch, L. Zuppiroli, C.F.O. Graeff, “Electrically detected magnetic resonance of organic and polymeric light emitting diodes,” *Journal of Non-Crystalline Solids* vol. 622, pp.338 - 340, Jun.2004.
- [39] : : D. Kaplan, I. Solomon, and N. F. Mott, “Explanation of the large spin-dependent recombination effect in semiconductors,” *J. Phys*, vol.39, no.4, pp 51-54, Feb 1978.
- [40] : J. T. Ryan, P. M. Lenahan, A. T. Krishnan and S. Krishnan, “Spin dependent tunneling spectroscopy in 1.2 nm dielectrics,” *Journal of Applied Physics*, vol.108, no.6,p. 064511, Sep.2010
- [41] : B. C. Bittel, P. M. Lenahan, J. T. Ryan, J. Fronheiser and A. J. Lelis, “Spin dependent charge pumping in SiC metal-oxide-semiconductor field-effect-transistors,” *Applied Physics Letters*. Vol.99, no.8, p.083504, out. 2011
- [42] : C .J Cochrane, P.M Lenahan, “Zero-field detection of spin dependent recombination with direct observation of electron nuclear hyperfine interactions in the absence of an oscillating electromagnetic field,” *Applied Physics Letters*, vol.112, no.12,p. 123714, Dec.2012
- [43] : B. C. Bittel , thesis, “Study of defect structure and electrical transport in back end of line dielectrics and SiC MOSFETS,” *Pennsylvania State University*,2012.
- [44]: P.M. Lenahan , Atomic scale defects in MOS reliability problems, *Integrated Reliability Workshop Final Report (IRW)*, 2013 IEEE International, 13-17 Oct. 2013,pp.1
- [45] : TAHANOUT, C, rapport de confirmation « Implémentation d’une plateforme de caractérisation sous champ magnétique et de la spectroscopie EDMR (Electrically Detected Magnetic resonance) » , »Projet : Investigation de la microstructure des pièges responsables de la dégradation des dispositifs MOS (μ SD) » ,Centre de Développement des Technologies avancées, 2015 .
- [46] : C. J. Cochrane, thesis, “Development of New Atomic Scale Defect Identification Schemes in Micro / Nanoelectronics Incorporating Digital Signal Processing Methods for Investigating Zero/low Field Spin Dependent Transport and Passage Effects in Electrically Detected Magnetic Resonance,” *The Pennsylvania State University*, 2013
- [47] : Hang Chang Chieh), “Advances in PID Control,” edition Springer-Verlag. London, UK. ,1999
- [48] : IR2110, high and low dirver, international rectifier, datasheet.
- [49]: IRF840 Power transistor, International rectifié, datasheet.
- [50] : M.L. Meade, “Lock-in Amplifiers: Principles and Applications,” 1983, Peter Peregrinus Ltd., chapter 2, p16

Références Bibliographiques

[51] : R. H. Dicke, “The measurement of thermal radiation at microwave frequencies,” Rev. Sci. Instrum, vol. 17, pp. 286–275, 1946.

[52] : : D.W. Preston and E.R. Dietz, “The Art of Experimental Physics,”. John Wiley & Sons, New York, 1991, pp. 367-375.

[53] : JOËL REDOUTEY, troisième année CSA, les transistors à effet de champ MOS.

Ces dernières décennies, l'industrie micro-électronique a réalisé d'énormes progrès, tout les composants ont subit des profondes modifications pour répondre aux besoins des utilisateurs quotidienne, à utiliser des dispositifs de taille réduite et consommant moins d'énergie. Nous avons alors assistés à une évolution de la technologie CMOS et une course vers la miniaturisation des circuits intégrés et par conséquent le transistor MOS (MOSFET). Cette réduction d'échelle consiste à réduire la structure physique du transistor MOSFET en générale et les zones actives en particulier, l'une des principales conséquences est la réduction de l'oxyde de grille des MOSFET (un paramètre primordial dans le fonctionnement du composant), cela peut induire a l'apparition de certains défauts localisés dans l'oxyde et l'interface oxyde/silicium qui causent la dégradation des composants d'avantage (due à augmentation de champ électrique par la réduction de l'épaisseur de l'oxyde de grille).

Mots clés

CMOS, CI, MOSFET, VDMOSFET, SPIN, EDMR, RPE, Pont H , microélectronique