

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Génie Microélectronique

Présenté par
Chafia Chamek

Thème

Caractérisation de la microstructure de défaut dans les dispositifs MOS par la technique SDT (Spin-dependent tunneling)

Mémoire soutenu publiquement le 27/06/2017 devant le jury composé de :

M AREZKI BENFDILA

Professeur, ummto, Président

M HAKIM TAHI

Maitre de recherche A, CDTA, Encadreur

M Ahcen LAKHLEF

MCB, ummto, Examineur

M Takfarinas CHELLI

MAA, ummto, Examineur

Remerciements.

. Je tiens tout d'abord à remercier DIEU le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je remercie tout particulièrement mon Promoteur M^r TAHI Hakim attaché de recherche au CDTA, qui a proposé et dirigé ce travail, je le suis extrêmement reconnaissante pour ses précieux conseils, orientations, patience qui ont constitué un apport considérable sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à ses hautes qualités humaines.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à mon Co-promoteur M^r Benfedhila Professeur à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Je remercie aussi les membres du jury qui ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail

Mes vifs remerciements vont également du fond du cœur pour mes chères sœurs et mes chers frères

Mes remerciements vont également à tous mes amis

À toute la promotion génie micro-électronique



Dédicace

A

Ma

Mère

Chafia



Listes des figures

Listes des figures

Figure (I-1) : Diminution de la longueur du canal des transistors.....	2
Figure (I-2) : Evolution du nombre de transistors sur une puce de silicium.....	3
Figure (I-3) : structure d'un transistor MOSFET	4
Figure (I-4) : Effet de champ dans un transistor MOS.....	6
Figure (I-5) : Principe de fonctionnement du transistor MOSFET	7
Figure (I-6) : Diagrammes de bandes des matériaux constituant la capacité MOS	8
Figure (I-7) : diagramme de bande d'une structure mos à	8
Figure (I-8) : diagramme de bande plate.....	9
Figure (I-9) : régime de fonctionnement d'un transistor à canal N.....	11
Figure (I-10) : caractéristique idéal d'un transistor MOS	12
Figure (I-11) : motif de base de la silice	14
Figure (I-12) : Diagramme de bandes d'énergie du système Si/SiO ₂	15
Figure (I-13) : Les types de charge d'oxyde et leurs localisations	16
Figure (I-14) : Représentation des états d'interfaces pour un substrat de type p (a) et de type n (b)	18
Figure (I-15) : Molécule d'oxyde de silicium SiO ₂ sans défaut à gauche et avec une lacune d'oxygène à droite	19
Figure (I-16) : Schéma d'un centre E'	19
Figure (I-17) : Représentation schématique des deux types de centre E' E' _δ a), avec une faible relaxation structurale au moment de la capture, et E' _γ b), qui montrent un grand déplacement atomique a la capture	20
Figure (I-18) : Représentation de quelques défauts à l'interface Si-SiO ₂	22
Figure (I-19) : réorientation schématique de la densité d'état d'interface introduit par les liaisons pendantes et distordues	23
Figure (I-20) : Diagramme de bandes du semi-conducteur faisant apparaître des pièges au niveau d'énergie	24

Listes des figures

Figure (I-21) : Illustration des différents mécanismes de piégeage	25
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	34
Figure (II-6) : Orientations d'énergie minimales et maximales de μ par rapport au champ magnétique B_0	34
Figure (II-7) : Induction des énergies d'état de rotation en fonction du champ magnétique B_0	7
Figure (II-8) : principe de fonctionnement de l'EPR	39
Figure (II-9) :.....	42
Figure (II-10) : phénomène des SDR.	43
Figure (II-11) : montage expérimental utilisé en pompage de charges.....	44
Figure (II-12) : Situations énergétiques à l'équilibre (NMOS) (a) inversion forte et (b) cumulation	45
Figure (II-13) : phénomène schématique SDT.....	47
Figure (III-1) : Schéma synoptique du produit proposé	50
Figure (III-2) : (a) Bobines d'Helmholtz ; (b) champ magnétique généré par les deux paires de bobines.	51
Figure (III-3) : schéma synoptique de la chaîne de mesure du champ magnétique.	52
Figure (III-4) : le diagramme du programme de régulation du champ magnétique	53
Figure (III-5) : modulation du champ magnétique (générateurs basse fréquence et amplificateur audio.....	53
Figure (III-6) : la longueur électrique du câble en fonction de la fréquence.....	55
Figure (III-7) : Schéma de l'oscillateur RLC.	55
Figure (III-8) : a) : résonateur réalisé b) : valeurs obtenus	57
Figure (III-9) : (a) test de circuit résonant ; (b) résultat de réflexion S_{11}	57
Figure (III-10) : chaîne d'acquisition de signal EDMR	57

Listes des figures

Figure (III-11) : diagramme de l'amplificateur à détection synchrone.	60
Figure (III-12) : diagramme du programme de l'amplificateur à détection synchrone implémenté sous LabVIEW.	61
Le logiciel du spectromètre a pour but le contrôle et la configuration des différentes parties du spectromètre :	62
Figure (III-13) : diagramme de programme de contrôle de spectromètre développé.	63
Figure (III-14) : interface du programme de contrôle de spectromètre.	64
Figure (III-15) : a) transistor de puissance IRF510 b) structure microscopique.....	65
Figure (III-16) structure de transistor VDMOSFET	66
Figure (III-17) : a) courant de grille (IG) en fonction de tension de polarisation (VG), b) schéma du montage expérimental de mesure de courant de grille (IG).....	67
Figure (III-18) : signal à l'entrée de la carte son du PC.....	67
Figure (III-19) : densité spectrale du signal EDMR.....	68
Figure (III-20) : signal EDMR filtré par un filtre passe band	68
Figure (III-21) : signal EDMR multiplié par un signal de référence.....	69
Figure (III-22) : signal EDMR filtré par un passe bas	69
Figure (III-23) : la moyenne du signal EDMR.....	70
Figure (III-24) : a) spectre de résonance de SDT, b) microstructure piège E'center 74G	70
Figure (III-25) : a) Zoome du pic principale, b) microstructure piège E' center 10 .4G	71

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..... 51

Liste des abréviations

Liste des abréviations

CMOS : complementary metal Oxid semiconctor

CDTA : centre de développement des technologies avancées

EDMR :Electricaly 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

VDMOSFET : Vertical Double diffused metal Oxid semiconctor Field Effect Transistor

Résumé

Résumé

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 a augmentation de champ électrique par la réduction de l'épaisseur de l'oxyde de grille .

La fiabilité et la dégradation des transistors MOSFET au cours du temps ont fait l'objet de nombreuses études. Nous avons fait le choix dans notre travail de se focaliser sur la caractérisation de la microstructure des défauts (pièges), dans le but analyser le type et la structure des pièges présent dans l'oxyde de grille (SiO_2) ou bien à l'interface Si/SiO_2 à l'échelle microscopique. Les techniques utilisées dans ce travail pour l'identification de microstructures des pièges sont basées sur la résonance paramagnétique électronique (RPE) et appelées Low Field Electrically Detected Magnetic Resonance (EDMR).

Mots clés

CMOS, CI, MOSFET, VDMOSFET, EDMR, EPR, SDT, SDR, microélectronique, Si/SiO_2 piège E' .

Table des matières

Tables des matières

Remerciements	I
Tables des matières	II
Liste des tableaux	III
Liste des figures	IV
Liste des abréviations	V
Résumé	VI
Introduction générale	1
Chapitre I : généralités sur le transistor à effet champ et les défauts d'interfaces Si/SiO₂	3
Introduction	3
I-Aperçu générale sur la structure du transistor à effet champs (MOSFET).....	4
I-1- Evolution de la technologie CMOS	4
I-2- Description des transistors à effet champs MOSFET	5
I-2-1 Présentation et historique du transistor à effet champs	5
I-2-2-architectures du transistor à effet champs.....	6
I-3- fonctionnement du transistor à effet champs	7
I-4-Capacité MOS: diagramme de bande d'énergie du transistor MOS à effet champ.....	9
I-4-1-régimes de fonctionnement d'un transistor à effet champ	11
I-4-1-1-Régime de Bandes Plates	11
I-4-1-2- Régime d'accumulation	12
I-4-1-3- Régime de déplétion ou de désertion	12
I-4-1-4- Régime d'inversion	12
I-5- Caractéristiques électriques du transistor MOSFET.....	13
I-6-Principaux paramètres électriques des transistors à effet champs	14
I-6-1- Tension de seuil V_{TH} :.....	14
I-6-2- Tension de bande plate V_{FB} (flat-band)	14
I-6-3-La pente sous seuil « S ».....	14

Table des matières

II-défauts dans l'interface	15
II-1-interface Si/SiO ₂	15
II-1-1-formation de l'oxyde de grille Si/SiO ₂	15
II-1-2-structure de base de SiO ₂	15
II-1-3-propriétés physiques et chimiques de l'oxyde SiO ₂	16
II-2-nature des défauts dans l'oxyde et l'interface Si/SiO ₂	17
II-2-1- classification des défauts	18
II-2-1-1- charge fixes dans l'oxyde	18
II-2-1-2- charge mobile dans l'oxyde	19
II-2-1-3- charge piégée dans l'oxyde.....	19
II-2-1-4- charge piégée dans l'interface	19
II-2-2-défauts dans l'oxyde	20
II-2-2-1-défauts extrinsèques	22
II-2-2-2-défauts intrinsèques.....	23
II-2-3-défauts dans l'interface	23
II-2-3-1- les liaisons pendantes.....	24
II-2-3-2- les liaisons distordues	25
II-3-comportement électrique des défauts :	25
II-3-1-notion de défaut électriquement actif	25
II-3-2-notion de piège.....	26
II-3-3-notion de section de capture	27
Conclusion	28

Table des matières

Chapitre II : caractérisation de la microstructure des défauts	29
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-moment de spin.....	33
I-3-effet Zeeman.....	33
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 à 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-recombinaison dépendant du spin (Spin -Dependent Recombination SDR)	40
II-2-1-2- pompage de charge dépendant spin (Spin-Dependent charge pumping SDCP)	43
II-2-1-2-1-description de la méthode SDCP	43
II-2-1-2-2- principe de fonctionnement.....	44
II-2-1-3- Tunnel dépendant du spin (Spin-Dependent tunneling SDT)	46
Conclusion	47

Table des matières

Chapitre III : description du spectromètre EDMR à faible champ	48
Introduction	48
I-Spectromètre EDMR (Electrically Detected Magnetic resonance).....	48
I-1- Aperçu sur le spectromètre EDMR réalisé	48
I-2-Application du spectromètre d'EDMR réalisé.....	49
I-3- Description du spectromètre réalisé.....	49
I-3-1-Bobines d'Helmholtz	49
I-3-2- Régulation du champ magnétique est génération d'une rampe	52
I-3-3-Modulation du champ magnétique (Générateur basse fréquence et amplificateur audio)	53
I-3-4-Circuit résonant.....	54
I-3-4-1-Test de circuit résonant	57
I-3-5-Chaîne de conditionnement de signal EDMR.....	58
I-3-6-Amplificateur à détection synchrone (lock in amplifier).....	59
I-3-7-Logiciel de contrôle du spectromètre EDMR développé.....	62
II-Dispositifs utilisés	64
II-1-introduction transistor MOSFET de puissance.....	64
II-2-structure du transistor VDMOSFET	64
III-partie expérimentale.....	65
III-1-mise en œuvre de la méthode	65
III-2-Résultats obtenus (spectre de résonance SDT)	70
Conclusion	72
Conclusion générale	73
Références bibliographiques	VII

Introduction général

Introduction générale

Les composants issus de la microélectronique sont omniprésents dans nos jours, grâce au développement de la conception des circuits intégrés (CI) qui a facilité de nombreuses tâches et activités quotidiennes, cela demande de sophistication plus les CI par l'intégration de plusieurs fonctionnalités, la source de cette évolution est le transistor **Métal-Oxyde-Semi-conducteur (MOS)**, la cellule de base de la technologie innovante et le cœur de chaque circuit intégré.

Le pilier sur lequel l'industrie microélectronique repose est la miniaturisation du transistor MOS à effet de champ (MOSFET), le point de départ de cette réduction est l'augmentation de la densité d'intégration qui peut aller jusqu'aux milliers de transistors sur la même puce, dont on passe de l'échelle microélectronique à celle de nanoélectronique ces dernières années. La réduction des dimensions physiques critiques des dispositifs élémentaires (la longueur de grille et l'épaisseur de l'oxyde) des transistors (MOS) provoque l'apparition des effets parasites, donc, la miniaturisation doit être accompagnée par des efforts technologiques dans le but d'améliorer le fonctionnement du transistor face aux défis (Effets canaux courts).

La fiabilité d'un transistor MOSFET repose largement sur 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 favorise leur multiplication et leurs injections dans l'oxyde. Il en résulte, alors, la création de différents types de défauts (pièges) qui causent par la suite la dégradation globale des paramètres déterminant les performances du transistor. Il est alors nécessaire d'étudier la microstructure de ces défauts (pièges), d'une part pour la compréhension des mécanismes physiques responsables de la création de ces défauts (modalisation) et d'autre part pour intervenir sur le procédé de fabrication pour minimiser ces défauts.

C'est dans ce contexte que l'objectif de la technologie d'avenir, est le développement de méthodes fiables de caractérisation pour prévoir la dégradation des circuits intégrés en général et le transistor MOS en particulier, durant son fonctionnement et d'arriver à des solutions qui atténuent certains phénomènes, tels que la création de pièges à l'interface, leurs évolutions dans le temps et leurs contributions à la dégradation des composants. En effet, les

Introduction général

recherches sont orientées vers les méthodes spectroscopiques telles que la méthode dite Electrically Detected Magnetic Resonance (EDMR), qui permet l'identification de la microstructure des pièges localisés à l'interface et dans l'oxyde. La méthode EDMR est basée sur la mesure de courant dépendant de spin, elle englobe les techniques suivantes : **SDR** (Spin Dependent Resonance), **SDCP** (Spin Dependent Charge Pumping) et **SDT** (Spin Dependent Tunneling) ; ces techniques permettent de caractériser automatiquement les composants durant son fonctionnement sans modifier les paramètres électriques contrairement aux techniques électriques. Dans ce travail nous allons utiliser la méthode **SDT** appliquée sur un transistor VDMOSFET de type n (IRF 510), pour identifier la microstructure des pièges dans l'oxyde de grille de ce transistor. Pour présenter notre travail nous avons mené le plan de travail suivant qui s'articule sur quatre chapitres :

Le premier chapitre du manuscrit débute par un bref rappel sur la structure du transistor MOS à effet de champ, les différents régimes qui gouvernent son fonctionnement ainsi que les paramètres électriques essentiels dans le fonctionnement du transistor. De plus nous nous concentrons sur les propriétés de l'empilement MOS plus précisément l'oxyde de grille SiO_2 et les défauts liés aux procédés de fabrication, en particulier les défauts ponctuels actifs situés à l'interface Si/SiO_2 .

Le deuxième chapitre commence par une introduction au magnétisme de la matière, ensuite résume les techniques des spectroscopies EDMR (**E**lectrically **D**etected **M**agnetic **R**esonance) et EPR (electron paramagnetic resonance) utilisées pour l'identification de la nature atomique (microstructure).

Le troisième chapitre décrit en premier le dispositif VDMOSFET sur lequel nous allons appliquer l'expérience, ainsi que le spectromètre EDMR à faible champ réalisé au sein du centre de développement technologique avancées CDTA. Ainsi les différentes étapes de l'expérience qui permettent d'obtenir le spectre de la résonance SDT, et les résultats obtenus avec interprétation.

Terminant par une conclusion globale sur notre étude suivie par des perspectives pour les prochaines recherches.

Introduction

Notamment le transistor semi-conducteur à effet champs domine l'industrie électronique : du transport et la communication à la médecine et autre, alors assurer un bon fonctionnement et une meilleur fiabilité dépend d'un tel dispositif, mais, les matériaux semi-conducteur peuvent avoir des défauts dans la structure surtout à l'échelle atomique qui limitent les performances des circuits intégrés et par conséquent des appareils.

C'est dans ce contexte , améliorer la performance d'un appareil dus aux défauts de la structure qui agissent comme étant des piègeages , il est nécessaire de comprendre le mécanisme de ce piègeage et de recombinaison qui joue un rôle primordiale 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, 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 matériaux : la structure et la symétrie du défaut , son environnement électronique locale et le mécanisme de transport de charge ainsi que la quantification du nombre de centre paramagnétique .

Ce chapitre introduit les concepts théoriques des méthodes expérimentales dont on site la RPE classique qui se limite par sa faible sensibilité qui est surmonté par la suite par la EDMR qui se devisent en trois spectroscopies principales : **Spin-Dependent-Recombination (SDR)**, **Spin Spin-Dependent-tunneling (SDT)** et **Spin-Dependent-Charge-Pumping (SDCP)** ;EDMR combine entre la sélectivité microscopique de EPR et la sensibilité à la mesure de courant cela peut apporter plus d'avantage comparant à EPR .[24,25]

I-magnétisme de la matière

I-1-introduction au magnétisme

I-1-1-notion de spin électronique

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 [3], 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). [27]

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 différente de la mécanique classique.

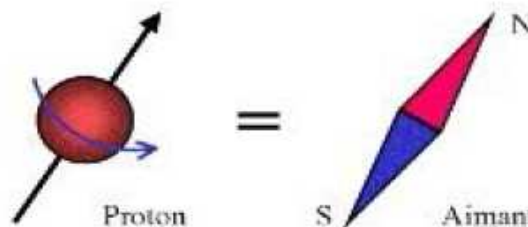


Figure (II-1) : représentation schématique d'un spin [27]

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. [27] (Voir figure II-2)

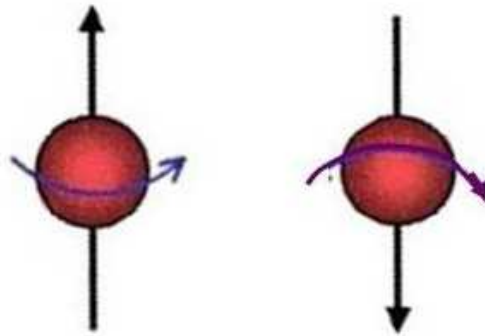


Figure (II-2) : représentation des états d'un spin [27]

Une autre propriété intéressante 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 magnétique .[27]

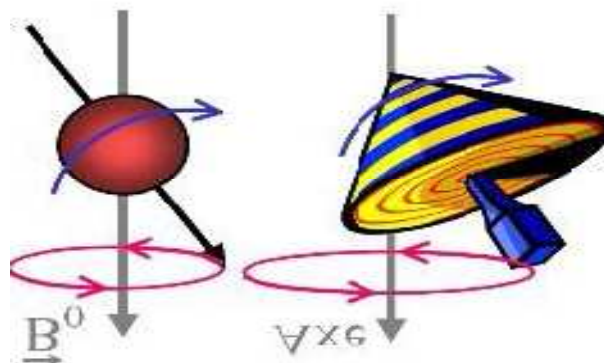


Figure (II-3) : orientation des spins dans un champ magnétique [27]

I-2- moment magnétique

Un matériau est un ensemble de cristaux, 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. [28,29]

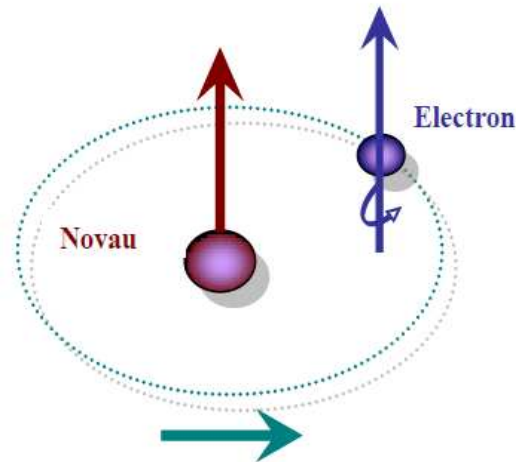


Figure (II-4) : Mouvement de l'électron. [28]

A partir de là deux notions élémentaires peuvent être définie : 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 : [28,29]

$$i = e.f$$

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 :

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

Où :

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). [30]

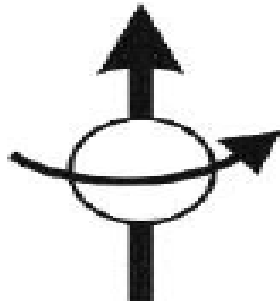


Figure (II-5) : moment magnétique d'un électron libre [30]

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.

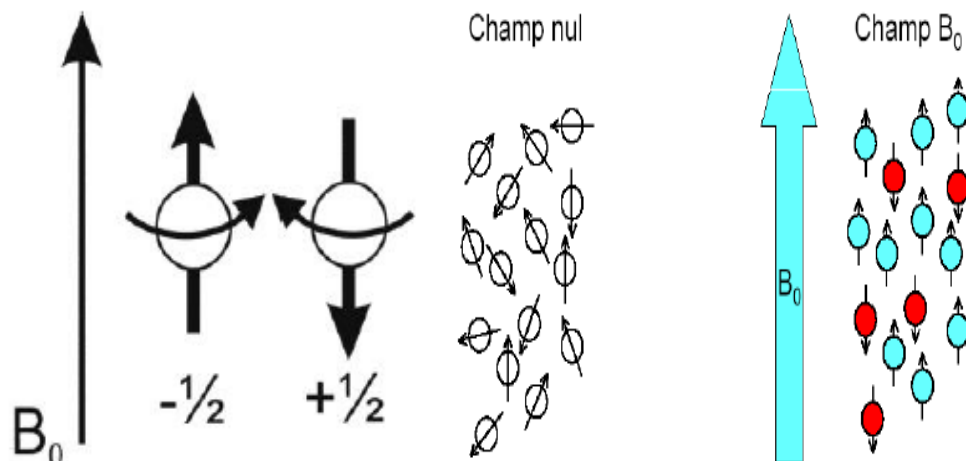


Figure (II-6) : Orientations d'énergie minimales et maximales de par rapport au champ magnétique B_0 [30,31].

Chapitre II : caractérisation de la microstructure des défauts

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 : [30]

- 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 :

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

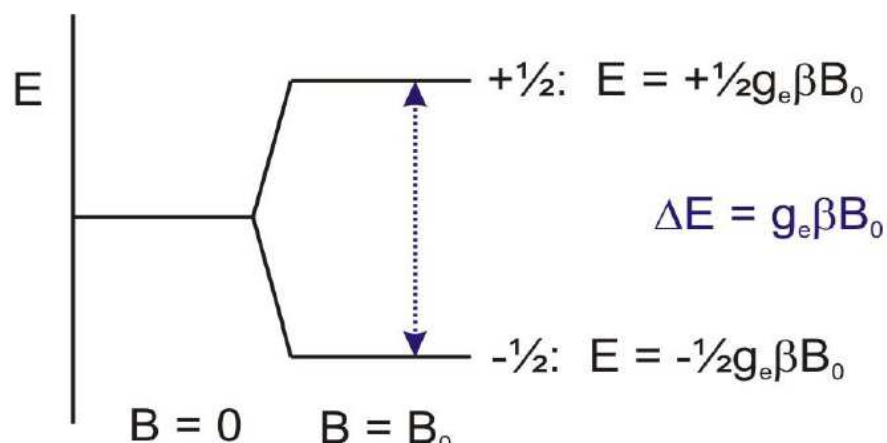


Figure (II-7) : Induction des énergies d'état de rotation en fonction du champ magnétique B_0 [30].

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.

[30]

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. [32]

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 : [32]

Où : $\Delta E = h\nu$ Eq (II-6)

- h : est la constante de Planck ($6, 63.10^{-34}$ 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 .

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

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. [33]

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 $\Delta E = h\omega = E_\alpha - E_\beta = g_e \beta H_0$ est réalisée.

Généralement, compte tenu de la valeur de $g_e \beta$, on travaille à fréquence fixe 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). [34,35]

II-présentation et discussion 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

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 lorsque 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 lesquels des transitions peuvent avoir lieu, le but de la résonance paramagnétique électronique est précisément l'étude de ces transition pour designer une telle spectroscopie plusieurs termes sont associés dans la littérature anglo-saxon : [36]

- 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 [34,37] , 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 structurelles des défauts de limitation de la performance dans les systèmes Si/SiO₂ [38]

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 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. [37]

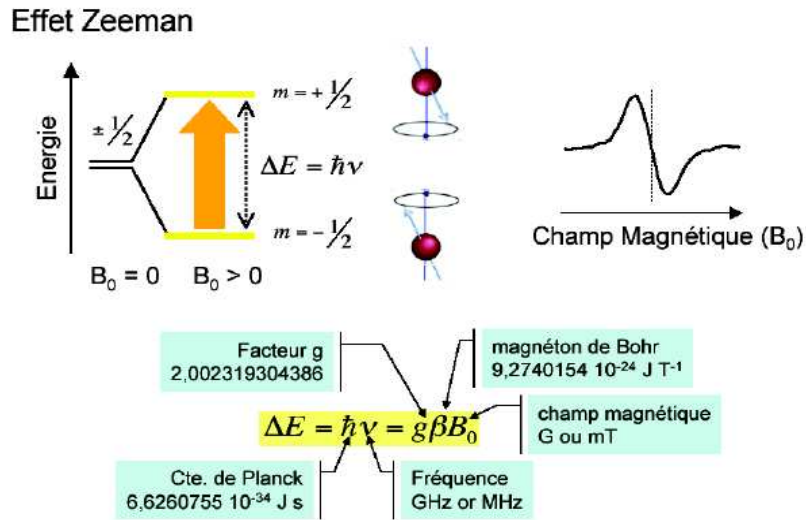


Figure (II-8) : principe de fonctionnement de l'EPR [30]

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 (voir figure II-8), et l'électron dans l'état d'énergie inférieur est capable d'absorber l'énergie appliquée et 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 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 : [17]

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

- 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 / cm^3) 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 [17].

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 a 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 10^6 [25]

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 [15].

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. » [38].

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 (^{31}P) 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 ^{31}P 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

II-2-1-1-1- *présentations 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 événements 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 apparaitront dans le spectre observé pour fournir des détails sur la structure atomiques impliquée

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 [37,]. 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

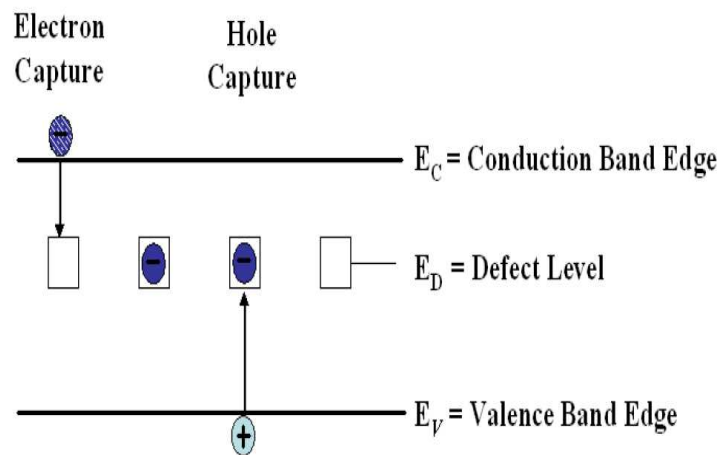


Figure (II-9) : illustration schématique du modèle shockley read hall pour la recombinaison [38]

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 illustrés sur la figure (II-10) augmente le courant de recombinaison [38,40] 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.

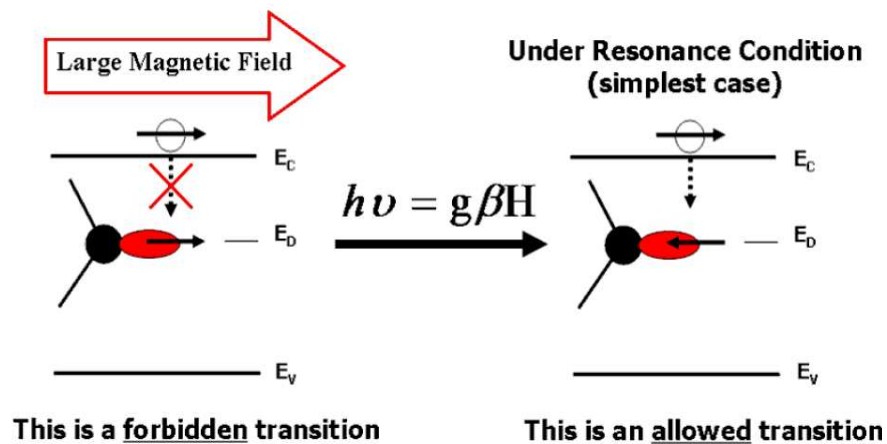


Figure (II-10) : phénomène des SDR. [38]

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

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

La technique de pompage de charge (Spin-Dependent charge pumping SDCP) à été introduite par Brugler et Jaspers pour la première fois en 1969 ; 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 est dit pompage de charge s'effectue au travers des pièges de l'interface Si /SiO₂.

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 à 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 électroniques ; mais ne fournis pas les informations sur la structure à l'échelle atomique [38,42]

II-2-1-2-2- principe de fonctionnement

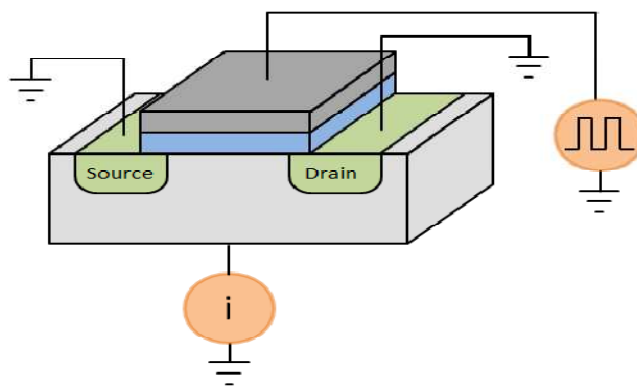


Figure (II-11) : montage expérimental utilisé en pompage de charges [42]

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.

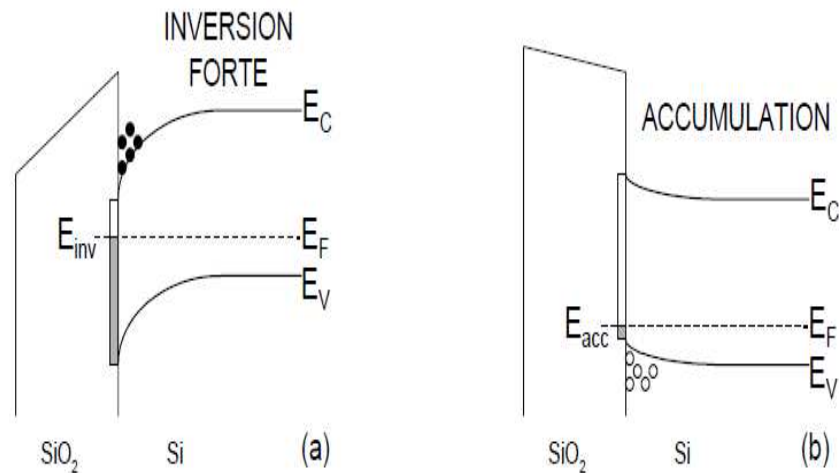


Figure (II-12) : Situations énergétiques à l'équilibre (NMOS) (a) inversion forte et (b) cumulation [42]

- 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).

Ainsi à chaque période du signal de grille, des porteurs minoritaires provenant des régions de source et de drain se recombinaient 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} .

II-2-1-3- 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 structurelle des défauts situer dans le 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 expliquer 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 du 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.[38,41].

En résumé le tunnel peut uniquement se produire (autorisé) lorsque deux défauts ont des nombres quantiques de spin opposés, si les deux défauts ont le même nombre quantique de spin, le principe d'exclusion de Pauli n'autorisera pas le passage du tunnel (interdit). [38].

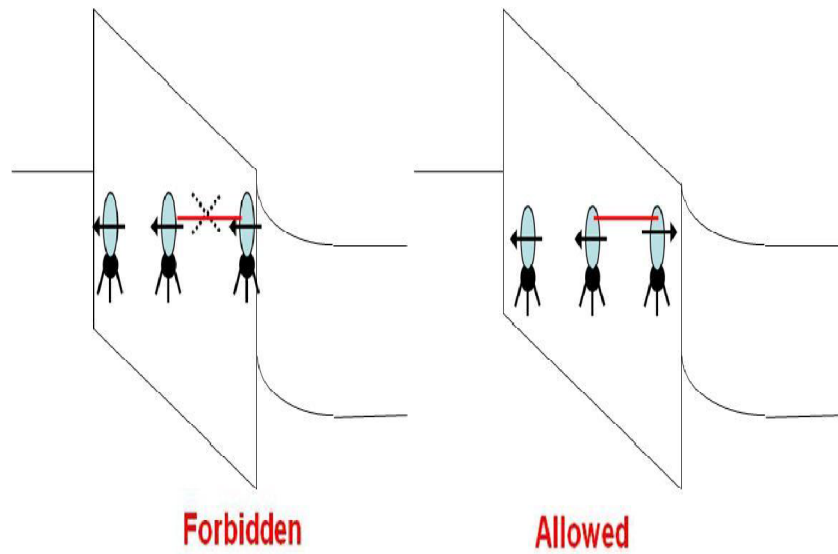


Figure (II-13) : phénomène schématisé SDT

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 de la microstructure des défauts dans la structure atomique des semi-conducteurs.

Nous avons constatés que l'identification des défauts dans l'interface Si/SiO₂ est un paramètre très important pour comprendre les mécanismes responsable 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 par la spectroscopie SDT qui sera mis en œuvre dans l'expérimentale.

Introduction

Le développement de la technologie microélectronique et les processus de fabrication des transistors MOS vers des structure de l'échelle nanométrique est accompagnées par la réduction des paramètres fondamentaux pour qui assurent le meilleur fonctionnement, il en résulte l'apparition des défauts, en généralement, à l'interface Si/SiO₂ et/ou bien dans l'oxyde (voir chapitre I).

C'est pour cela ce chapitre présente ,en premier temps la description du spectromètre EDMR à faible champs et les différents matériaux utilisés pour mettre en pratique la technique de résonance paramagnétique de spin SDT réalisé au centre de développement des technologies avancées (CDTA) sur un transistor VDMOSFET de type n (IRF510).En seconde étape nous allons décrire le transistor VDMOSFET (Vertical Double diffused MOSFET).En dernier nous allons présenté la partie expérimentale et analyser les résultats obtenus, cela nous permettra d'identifier le type des défauts présent dans notre dispositif .

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 ...) [43-44] Comme les défauts électriquement activés sont généralement des électrons non appariés (défauts paramagnétiques), ils sont influencés par des champs magnétiques externes qui peuvent modifier diverses mécanismes de transport dans les dispositifs tels que la recombinaison (SDR : Spin Dependent Recombination) [45], l'effet tunnel [46] (SDT : Spin Dependent Tunneling), et le pompage de charge (SDCP : Spin Dependent Charge Pumping). [47]

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 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 ; [48]
- ❖ Poids sensiblement plus faible ;
- ❖ 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 : [49-50] :

- ❖ 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 : [51]

- Deux paires de bobines d'Helmholtz;
- Un circuit résonant;

Chapitre III : description du spectromètre EDMR à faible champ

- Mesure et acquisition de champ magnétique (gaussmètre);
- 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.

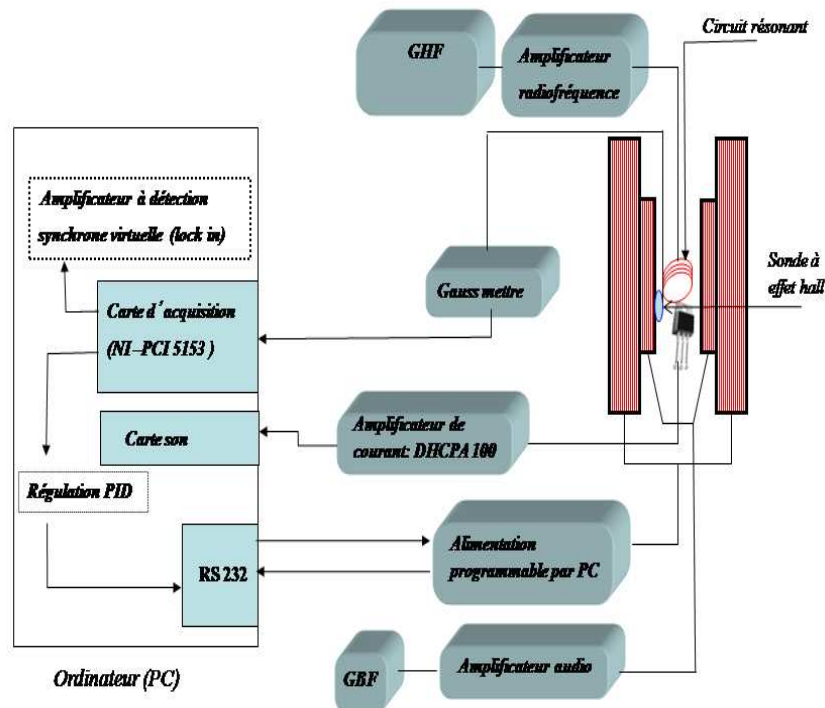


Figure (III-1) : Schéma synoptique du produit proposé [51]

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. [51] La figure (III-2) présente les deux paires de bobines et le champ magnétique généré par ces bobines.

Chapitre III : description du spectromètre EDMR à faible champ

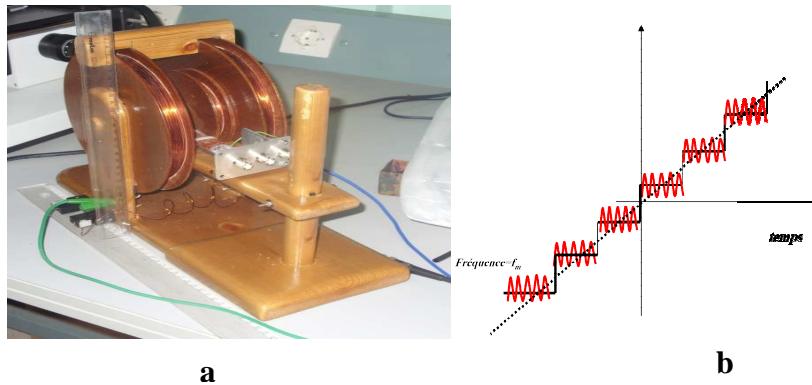


Figure (III-2) : (a) Bobines d’Helmholtz ; (b) champ magnétique généré par les deux paires de bobines. [51]

Les caractéristiques des deux paires de bobines, sont résumées dans le tableau (III-1) : [9]

N°	Spécification	Valeur
1	nombre de tours par enroulement	$N_m=400, N_s=700$
2	Fil	16SWG
3	Résistance totale	$R_m=1,2\Omega, R_s=4\Omega$
4	Diamètre interne de la bobine	$r_m=2,5 \text{ Cm}, r_s=8,5 \text{ Cm}$
5	Largeur de la bobine	$H_m= 3\text{cm}, H_s=4.5\text{cm}$
6	Profondeur de la bobine	$D_m=1\text{cm}, D_s=2 \text{ cm}$
7	Matériel de construction	Amagnétique
8	Voltage	$V_m =40\text{V}, V_s =10\text{V}$
9	Masse de la bobine	10kg
10	Intensité du champ magnétique	$B_m=20, B_s= 200 \text{ Gauss}$

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 [51]

Chapitre III : description du 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) [52] ; 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. [51]

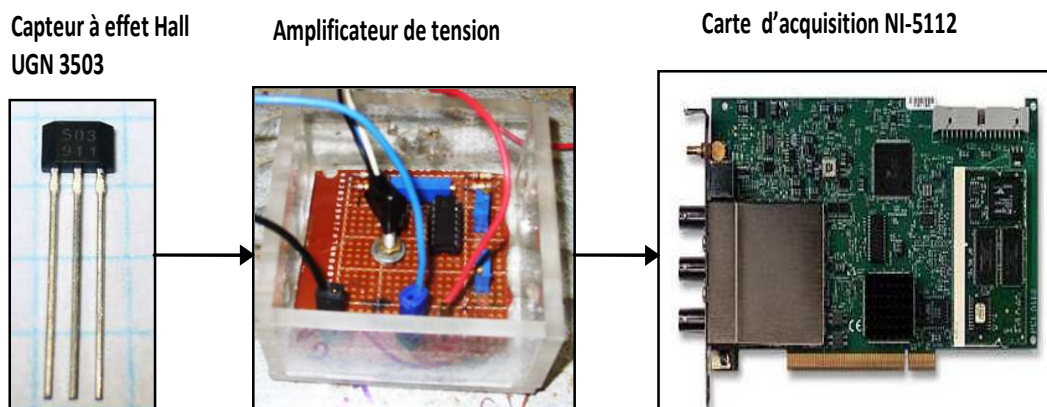


Figure (III-3) : schéma synoptique de la chaîne de mesure du champ magnétique. [21]

Pour réguler et générer une rampe de champ magnétique contrôlable (0-200 Gauss) ; nous avons implémenté sous LabVIEW un régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé) [53] ; ce dernier agit sur une alimentation contrôlé 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) :

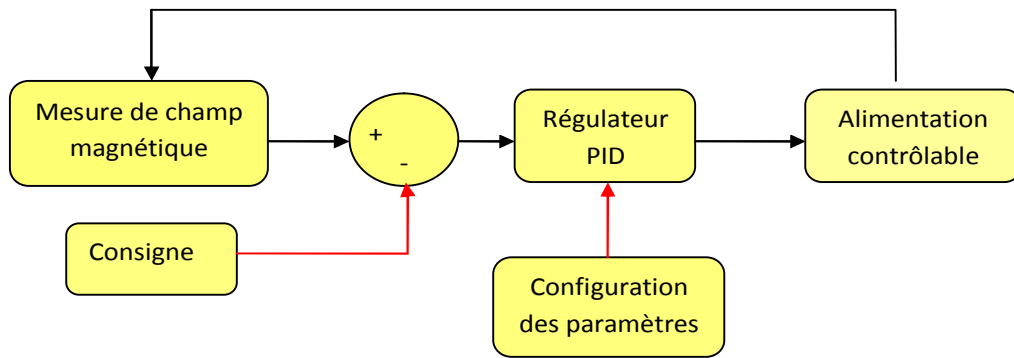


Figure (III-4): le diagramme du programme de régulation du champ magnétique [51]

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 220kHz

Par conséquent, la modulation avec un signal audio ($1\text{kHz}-20\text{kHz}$) satisfait largement les deux conditions citées [51]. La figure. (III-5) donne le montage de modulation du champ magnétique :

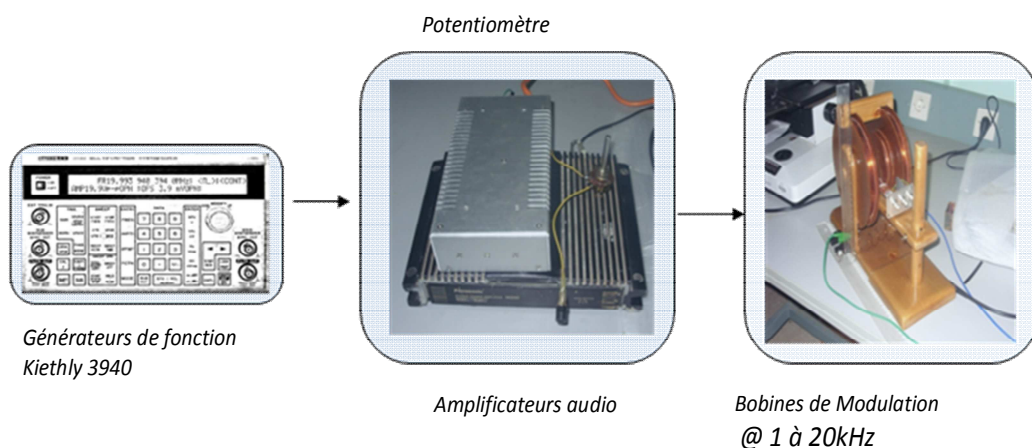


Figure (III-5) : modulation du champ magnétique (générateurs basse fréquence et amplificateur audio). [51]

Chapitre III : description du 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 supérieure 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 recourir à la théorie des lignes de transmission est de 14 cm ; voir (figure III-6) : [51]

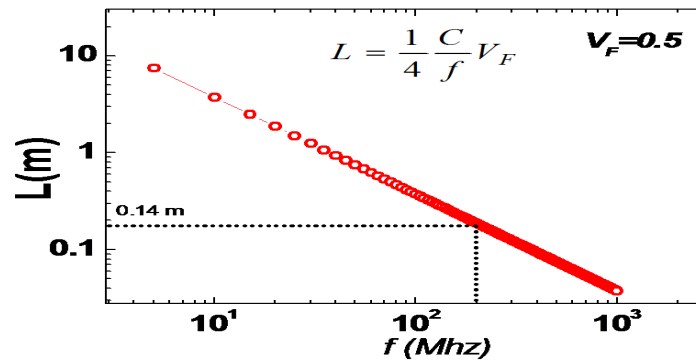


Figure (III-6) : la longueur électrique du câble en fonction de la fréquence [51]

Pour ne pas chevaucher la résonance avec celle de « zero field : résonance à $B=0$ » qui peut être large de 100 Gauss centré sur $B = 0$ [6] ; 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).

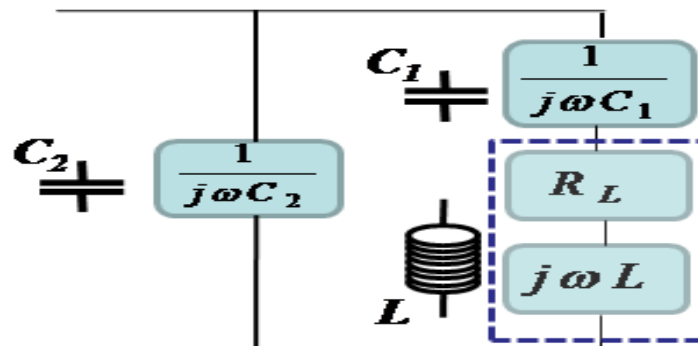


Figure (III-7). Schéma de l'oscillateur RLC. [51]

Chapitre III : description du 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 en 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 :

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

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 $\omega L > R$.

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 ;

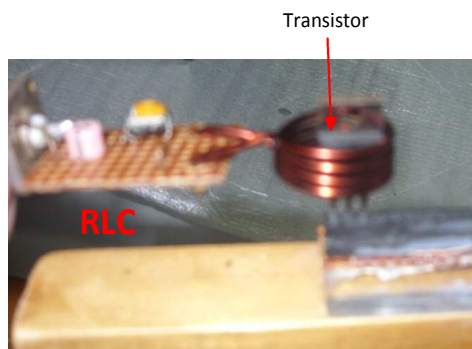
Chapitre III : description du spectromètre EDMR à faible champ

L : est la longueur du fil de la bobine.

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 (IRF 9530) [12] ; 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 50 Ω .

Le circuit résonant est alimenté par une génératrice radiofréquence Agilent 8648D. [51]



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 [51]

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 :

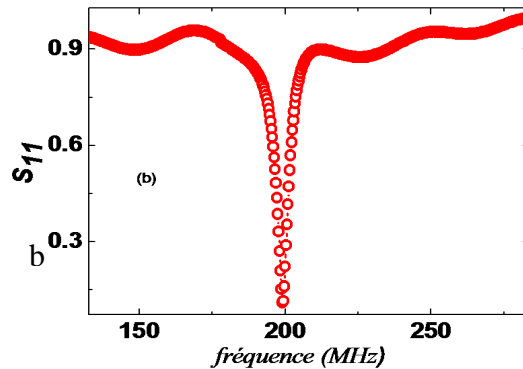
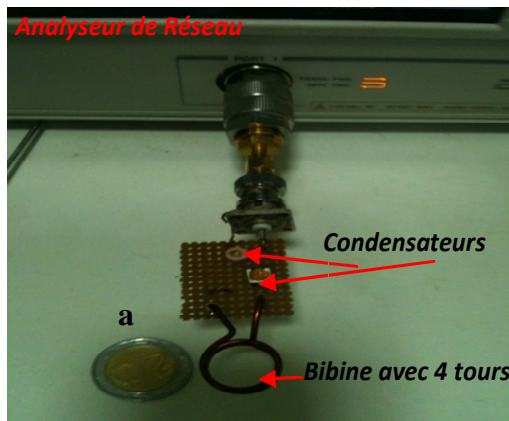


Figure (III-9) : (a) test de circuit résonant ; (b) résultat de réflexion S_{11} . [51]

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) [13]; 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).

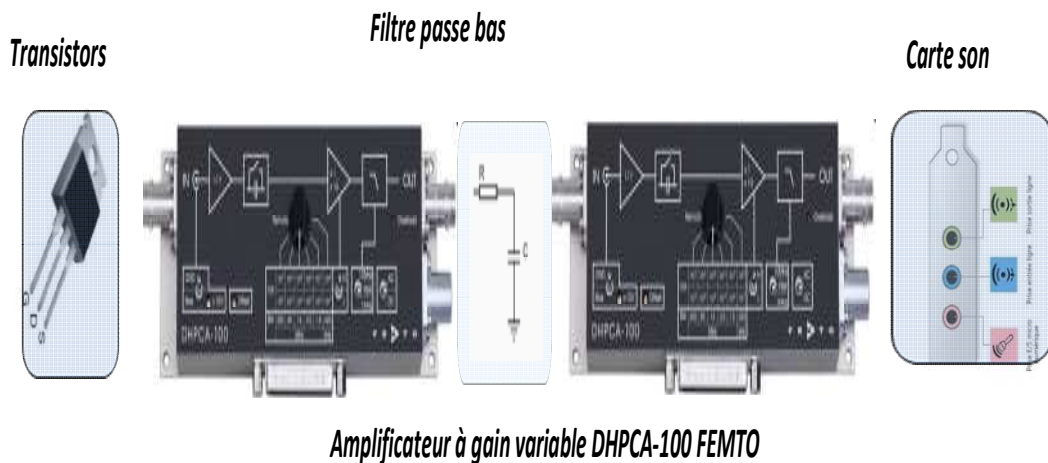


Figure (III-10) : chaîne d'acquisition de signal EDMR [51]

Chapitre III : description du spectromètre EDMR à faible champ

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

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

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 amplif

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) [56] ; 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 amplif) [54-58]; 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 modulation. 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)

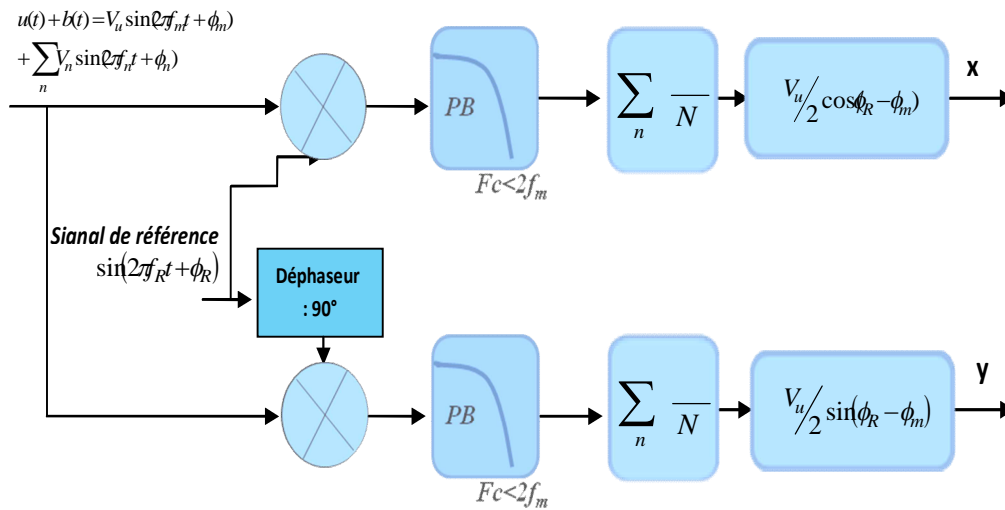


Figure (III-11) : diagramme de l'amplificateur à détection synchrone. [51]

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 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.

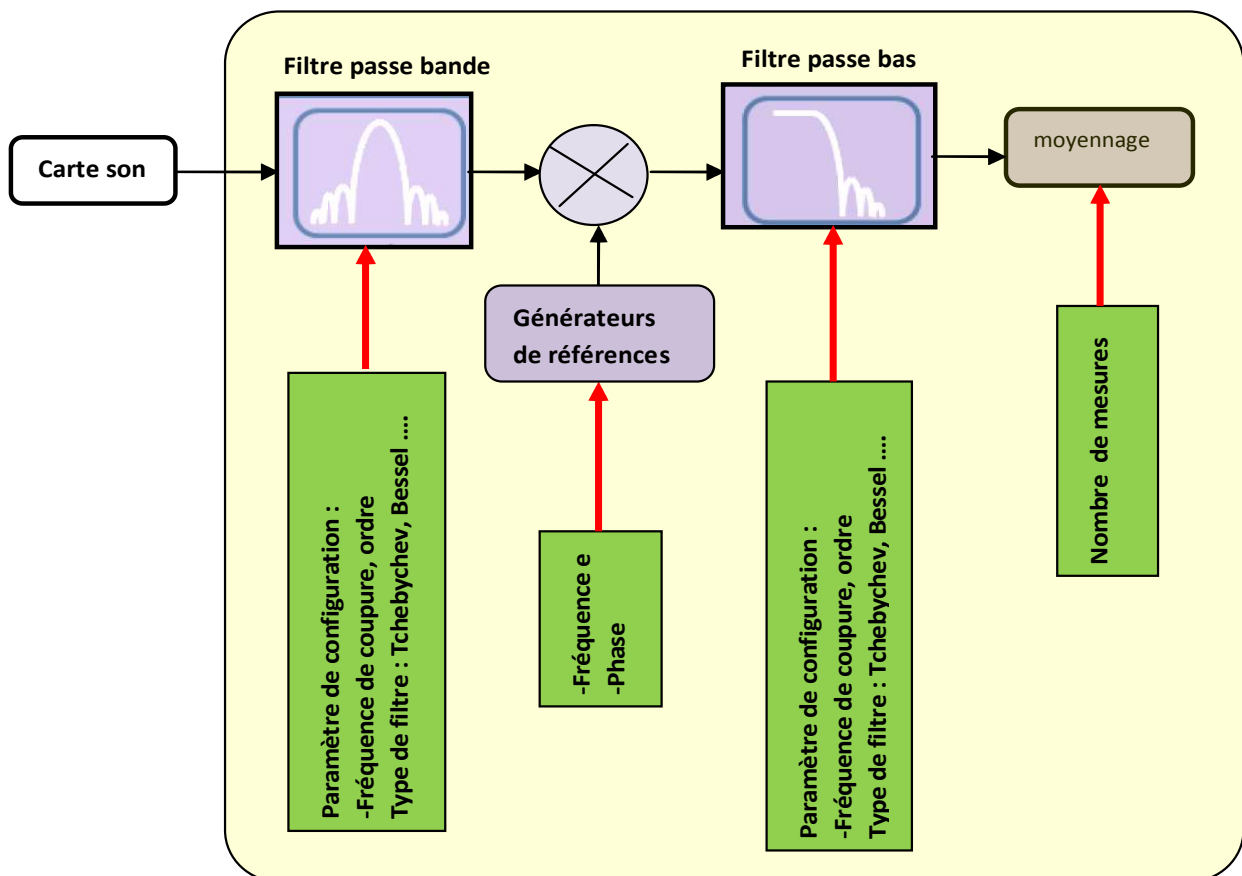


Figure (III-12) : diagramme du programme de l'amplificateur à détection synchrone implémenté sous LabVIEW. [51]

Chapitre III : description du 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 : [51]

- 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 :

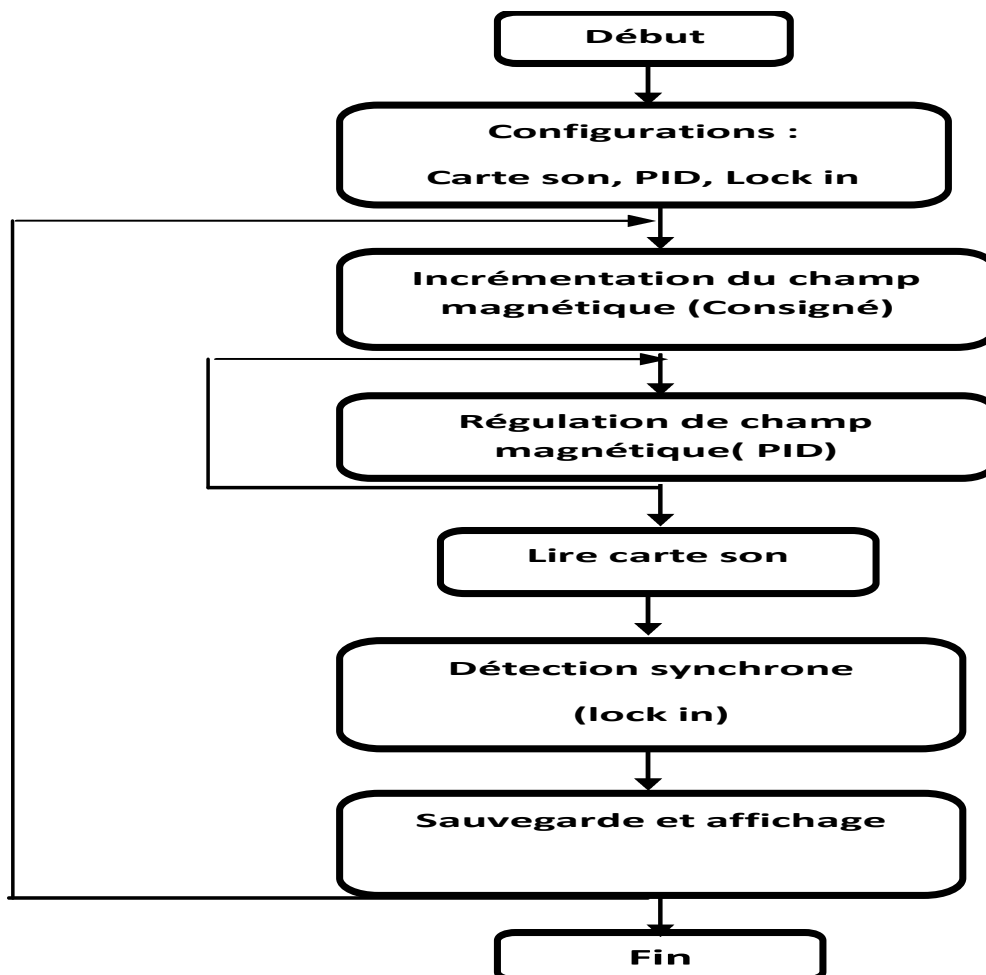
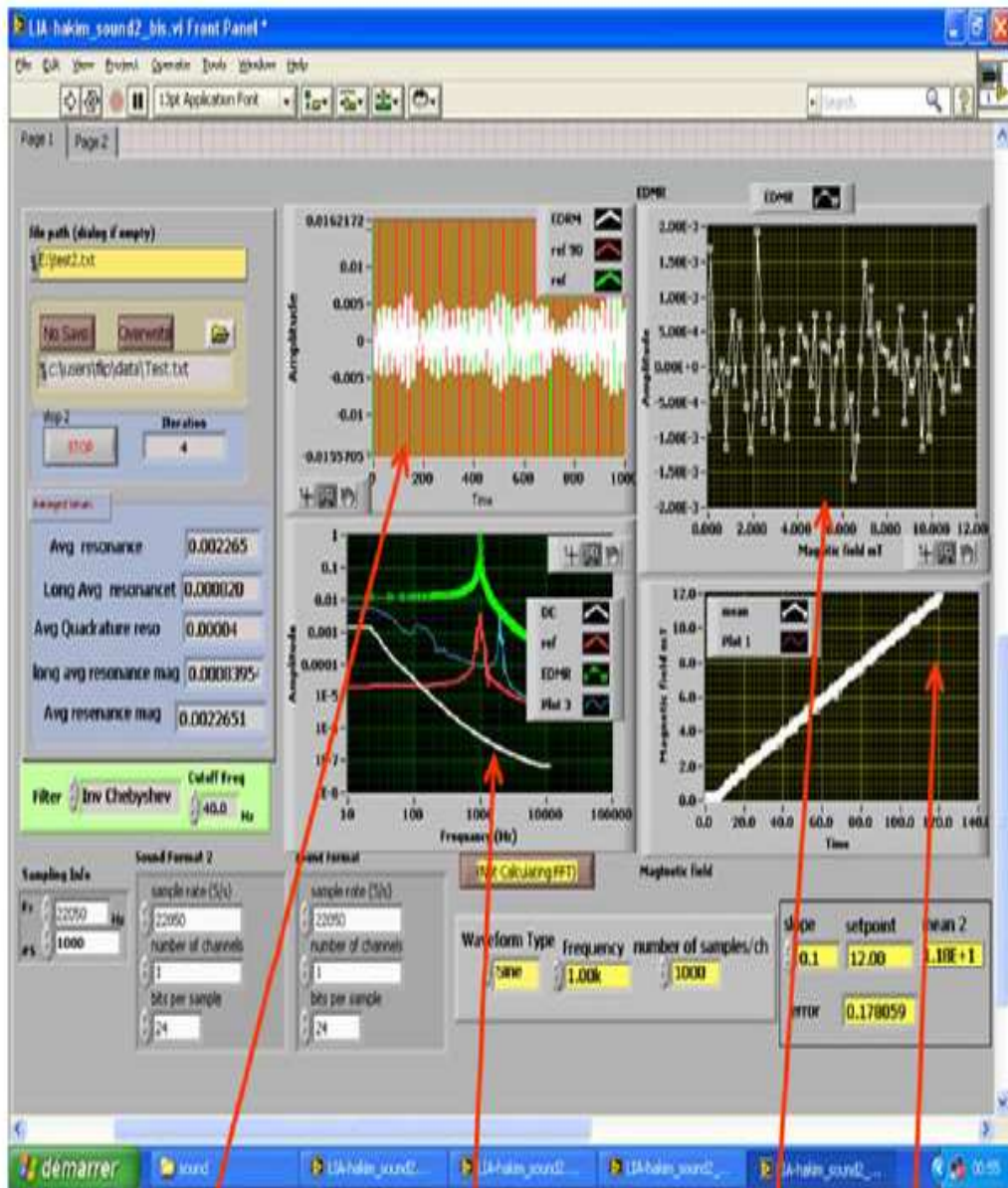


Figure (III-13) : diagramme de programme de contrôle de spectromètre développé. [51]

Chapitre III : description du spectromètre EDMR à faible champ



Signal EDMR Modulé +
Deux références sinusoïdales

Transforme de Fourier FFT

signal EDMR

Champ magnétique

Figure (III-14) : interface du programme de contrôle de spectromètre. [51]

II-Dispositifs utilisés

II-1-introduction 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 utilisés dans ce travail sont des transistors de puissance VDMOSFET commerciaux IRF 510 (voir figure III-15a). En effet, dans la section suivante nous allons donner un aperçu générale sur la structure d'un VDMOSFET. La figure (III-15b) présente une photo du microscope optiques, cette photo montre que les transistors de puissance VDMOSFET est constitué de cellules de transistors VDMOSFET.

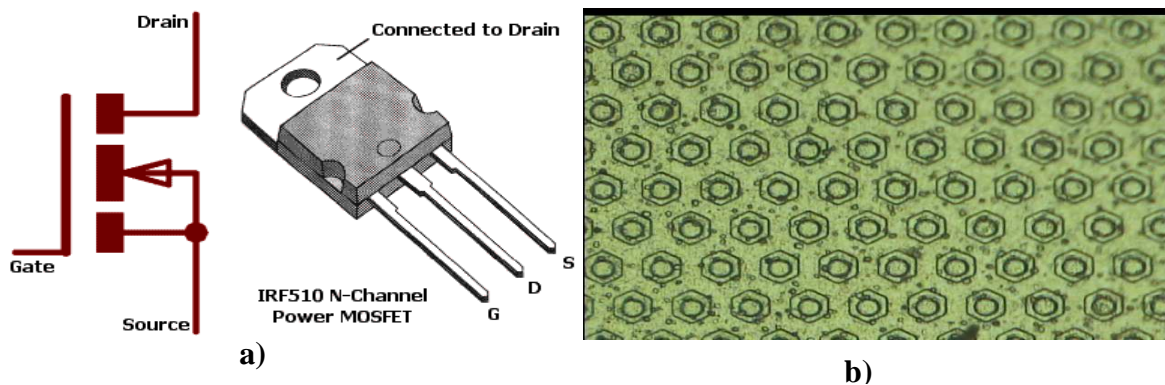


Figure (III-15) :a) transistor de puissance IRF510 b) structure microscopique

II-2-structure du transistor VDMOSFET

Le VDMOSFET (Vertical Double diffusé MOS) est largement utilisé dans l'électronique de puissance, il a une structure proche de celle du MOSFET conventionnelle (Voir Chapitre 1), la différence provient de la position du drain situé sous le composant. La fabrication d'une telle structure repose sur le processus de double diffusion, la source et la grille plantées sur la surface de la puce par contre le drain à l'arrière (voir figure III-16). Il est constitué d'un substrat en silicium dans lequel deux zones de conduction très fortement dopées sont diffusées opposées au substrat constituant la source et drain, la grille en métal isolée totalement du canal par un oxyde de silicium (SiO_2). [60]

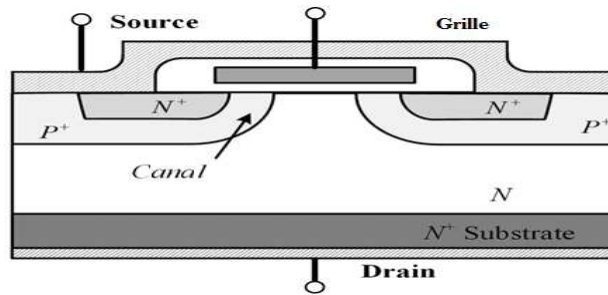


Figure (III-16) structure de transistor VDMOSFET

La source est connecté à une région en surface fortement dopée en électrons N^+ , cette zone est confinée dans une région P situé sous la grille, alors le canal se forme dans cette région [60].

- ❖ Lorsque la tension au niveau de la grille est positive ($V_{GS} > 0$) est inférieure à celle de seuil V_{TH} , il se forme une zone de déplétion au canal (zone P), le canal alors isolant et le composant à l'état bloqué ;
- ❖ Lorsque la tension de la grille est supérieure à la tension de seuil V_{TH} les porteurs de charge seront inversés dans le canal provoque la circulation de ses derniers, un courant peut alors circuler entre le drain et la source il traverse alors le composant d'une manière verticale. Si on augmente la tension de la grille, la conductivité du canal accroît et par conséquent le courant circulant.

III-partie expérimentale

III-1-mise en œuvre de la méthode

La partie expérimentale résume les différentes étapes de caractérisation du transistor VDMOSFET de type NMOS (IRF510) par la technique SDT, dont nous avons mesurés le courant tunnel traversant le dispositif ; afin d'avoir un signal EDMR final qui va nous permettre par la suite d'identifier la nature des défauts.

Avant de mesurer le courant tunnel dépendant de spin (SDT), nous avons mesuré le courant qui traverse la grille du transistor utilisé, selon le montage à côté de la figure (VI-1), le résultat obtenu correspond au courant de grille (I_G) en fonction de la tension de polarisation appliquée à la grille (V_G).

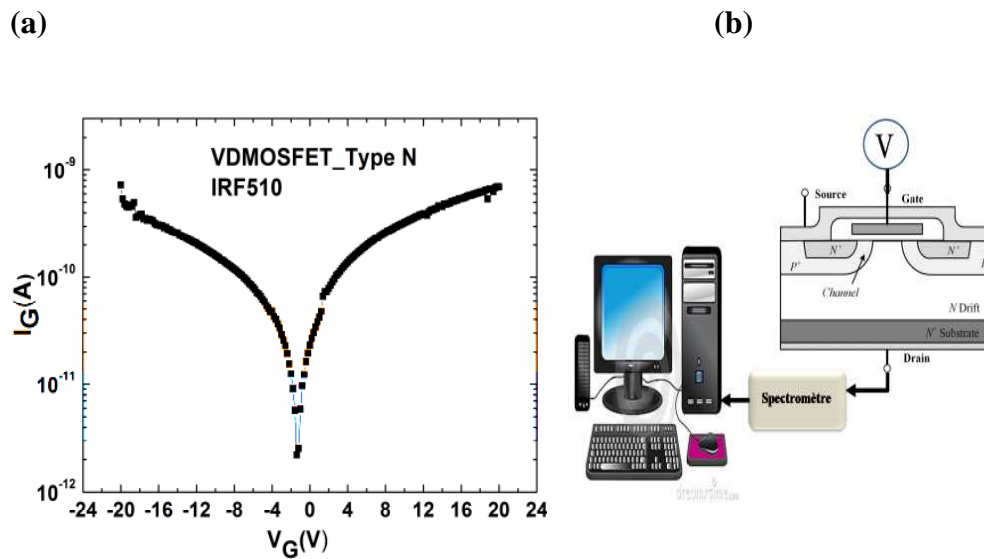


Figure (III-17) : a) courant de grille (I_G) en fonction de tension de polarisation (V_G) b) schéma du montage expérimental de mesure de courant de grille (I_G)

Le transistor caractérisé a été mis à l'intérieur de résonateur (voir chapitre 3 figure III-8), le tout était placé entre les deux bobines d'Helmholtz. Ensuite, le champ magnétique DC est balayé, automatiquement, de 0 à 12 mT (120 Gauss) avec un pas de 1 Gauss. La fréquence et le champ magnétique de modulation est de 2 KHz avec une amplitude de 1G (Gauss), La puissance et la fréquence du signal radiofréquence appliqué, sont respectivement de 1W et 200 Mhz. Le signal EDMR (SDT) à la sortie de l'amplificateur DHPKA 100, est automatiquement enregistré par la carte son, contrôlée par une application développée sous LabView.

- La première étape consiste à suivre le signal EDMR qui correspond au courant tunnel dépendant du spin (SDT) dans les différents étages du spectromètre. Le signal à l'entrée de la carte son du PC est présenté dans la figure (III-18), on constate que le signal EDMR est noyé dans le bruit expérimentale dus au bruit thermique du transistor ; bruit (1/f) et aux interférences électromagnétiques (signal de modulation plus les harmoniques de l'alimentation DC utilisé pour la génération du champ magnétique statique). Voir la densité spectrale du signal EDMR présenté par la figure (III-3)

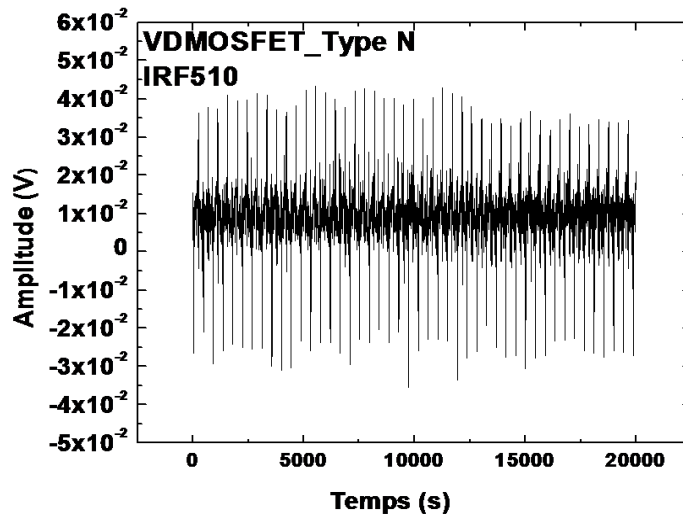


Figure (III-18) : signal à l'entrée de la carte son du PC

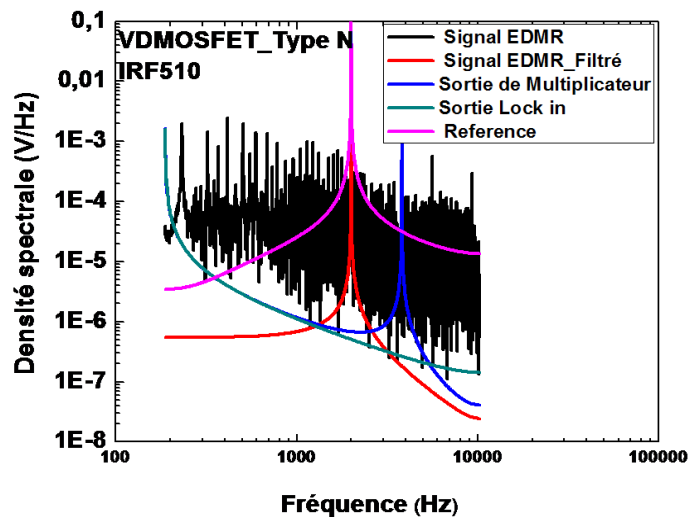


Figure (III-19) : densité spectrale du signal EDMR

- Après le filtrage du signal précédent (figure III-19) par un filtre passe band centré autour de la fréquence de modulation ($F_m = 2$ KHz) on obtient le signal présenté par la figure (III-20), La variation de l'amplitude de ce signal est dus au bruit qui accompagne le signal EDMR.

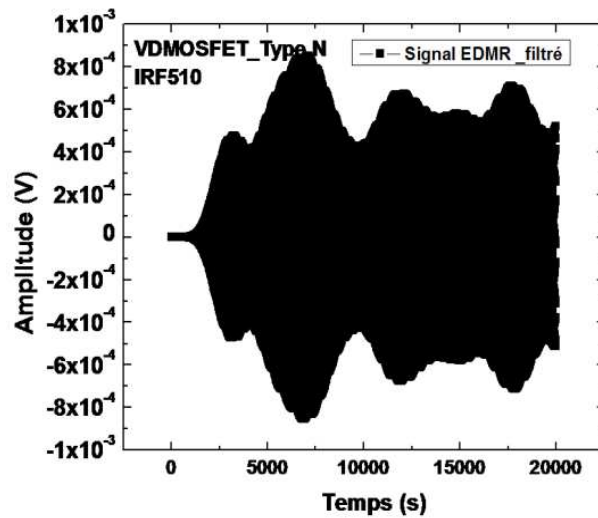


Figure (III-20) : signal EDMR filtré par un filtre passe band

- Par la suite le signal filtré est injecté dans deux multiplicateurs, qui vont multiplier le signal filtré de la figure (III-20) par deux signaux sinusoïdaux déphasés de $\pi/2$, appelés références présentés par figure (III-21), on obtient alors, à la sortie des multiplicateurs les signaux donnés par la figure (III-22) ; la densité spectrale de ces signaux montre la présence d'un signal sinusoïdale de fréquence deux fois la fréquence de modulation $2f_m$, (voir chapitre 3 I-3-5).

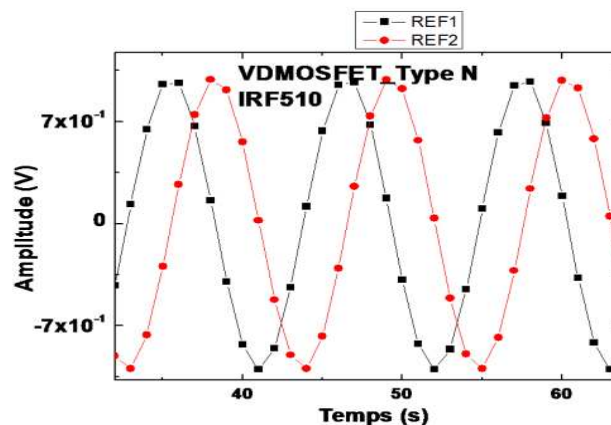


Figure (III-21) : signal EDMR multiplié par un signal de référence

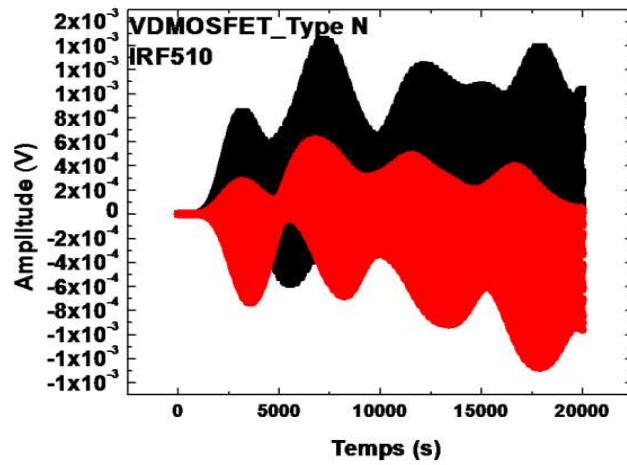


Figure (III-22) : signal EDMR filtré par un passe bas

Pour éliminer le signal de la fréquence $2f_m$, nous filtrons le signal précédent via un filtre passe bas de fréquence de coupure $< 2f_m$, on obtient, alors, le signal présenté par la figure (III-23). En moyennant les deux signaux présentés dans la figure (III-22) et en utilisant l'équation III-19 (voir chapitre 3), nous obtenons l'amplitude du signal SDT correspond au champ magnétique DC appliqué ; la densité spectrale du signal précédent est donné par la figure

(VI-7).

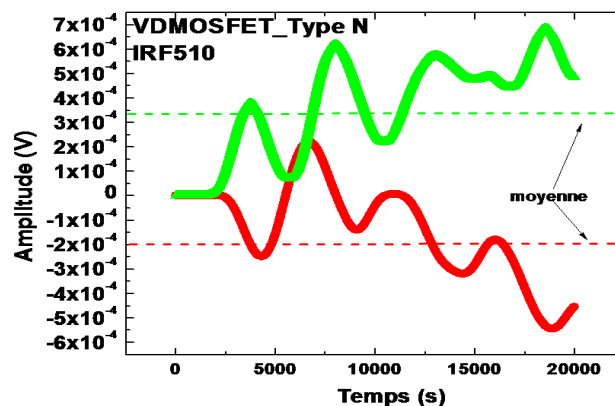


Figure (III-23) : la moyenne du signal EDMR

Chapitre III : description du spectromètre EDMR à faible champ

III-2-Résultats obtenus (spectre de résonance SDT)

On moyennant plusieurs mesures (33 mesures), cela dans le but d'éliminer le bruit de phase qui accompagne le signal SDT, nous obtenons le spectre de résonance présenté par la figure (III-24a). Le pic principal a 7.5mT (voir chapitre 2 Eq II-8) présente la résonance électronique des pièges paramagnétiques présent dans notre dispositif, les deux pics à 10.5 et à 3.4, correspondant au hyperfine (interaction entre le spin électronique et le spin nucléaire), La distance entre ses deux pics nous résigne sur le type de piège qui participe à la résonance. Dans ce spectre les deux pics sont distant de 7.1 mT qui est proche de celle correspond au piège E' (7.4 mT) appelé « E' centre 74G » (voir figure III-24b) []. La microstructure du piège E' centre 74G est présenté dans la figure III-25

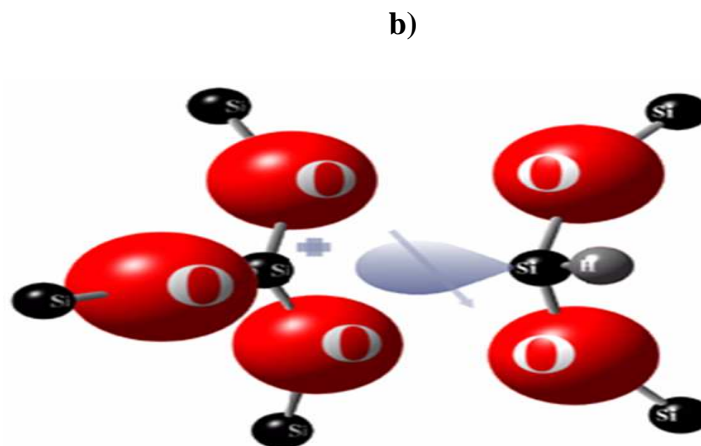
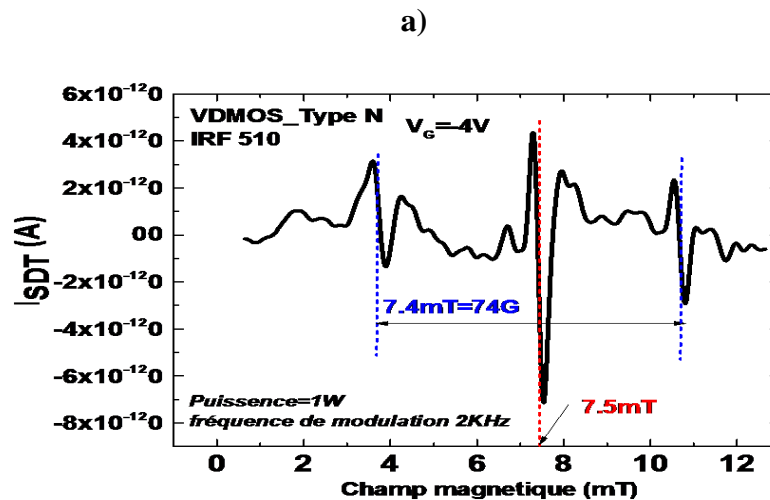


Figure (III-24) : a) spectre de résonance de SDT, b) microstructure piège E'center 74G

Chapitre III : description du spectromètre EDMR à faible champ

Le zome du pic principale est presentè par figure (III-25-a) , on constate deux petits pics distant de 1.04 mT correspond au E' centre 10.4 G (voir figure III-25b)

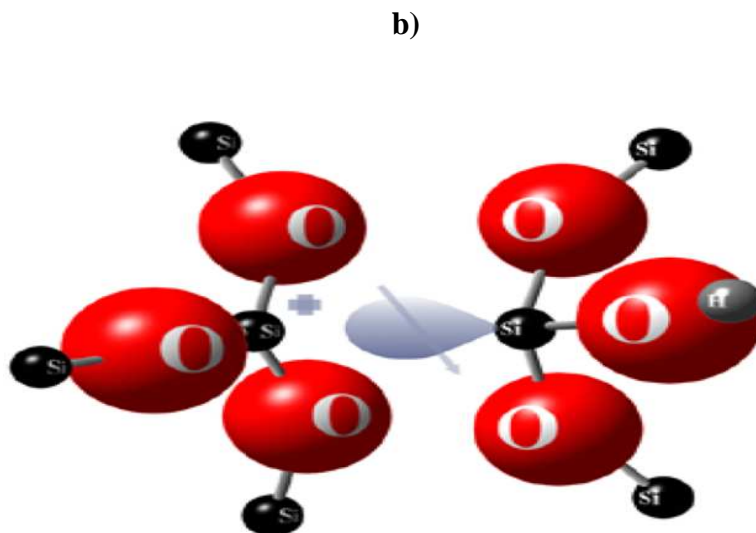
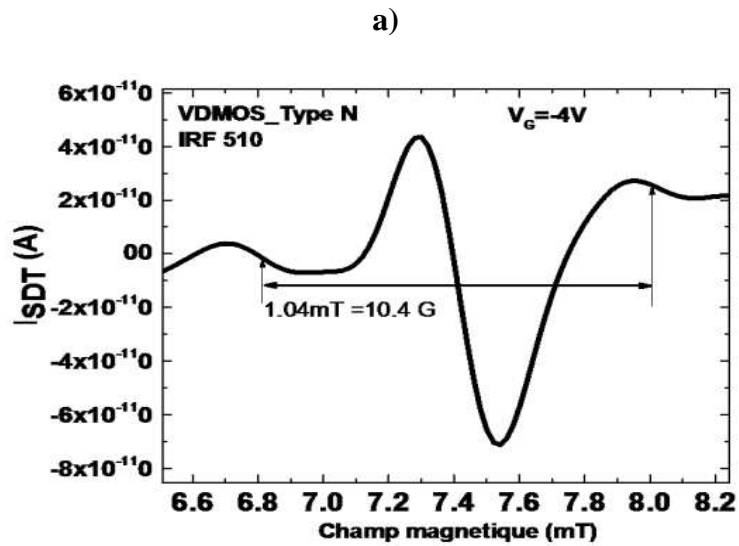


Figure (III-25) : a) Zoome du pic principale, b) microstructure piège E' center 10.4G

Conclusion

Ce chapitre présente la technique et le composant (transistor VDMOSFET) utilisés dans la partie expérimentale, pour cela nous avons décrit les différents constituants du spectromètre utilisé dans ce travail. Ainsi, nous avons présenté l'architecture du transistor VDMOS. Nous avons aussi exposés les différentes étapes qui permettent d'avoir le spectre de la résonance SDT par le spectromètre EDMR réalisé au CDTA. Le spectre de résonance SDT obtenu, pour un transistor commercial VDMOSFET de type NMOS (IRF 510), montre la présence de deux pièges dans l'oxyde de grille de ce transistor. L'un des « E' centre 74G » et l'autre est « E' centre 10.4G »

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail s'est focalisé sur l'identification de la microstructure des défauts qui peuvent se localiser dans l'oxyde et/ou l'interface Si/SiO₂ d'un transistor, par le spectromètre EDMR réalisé au CDTA avec la technique SDT (Spin Dependent Tunnelling) qui consiste à mesurer le courant tunnel dépendant du spin traversant le dispositif (l'oxyde de grille), appliqué au transistor de puissance commercial VDMOSFET (vertical double diffusion metal oxide semiconductor field effect transistor) de référence IRF510.

Pour ce faire nous avons effectué plusieurs mesures (33 mesures), nous avons obtenu un spectre SDT, qui nous a permis d'identifier deux types de microstructures de défauts existantes dans l'oxyde de grille du transistor utilisé, à savoir les variantes de défaut « E' centre » : « E'center 74 G » et « E'center 10.40G ».

L'obtention de ce spectre et l'identification de ces défauts ont passé par plusieurs étapes (voir chapitre 4) vu les difficultés rencontrées lors d'extraction du signal, car il est noyé dans le bruit, cela à cause du problème du spectromètre utilisé qui est très sensible aux perturbations (toute sorte de bruits) soit externe ou bien interne au dispositif caractérisé (transistor).

Malgré les difficultés rencontrées la structure des défauts localisés sur le transistor étudié ont été bien identifiés, et d'excellents résultats ont été obtenus (voir chapitre 4). En effet, durant ce travail nous avons pu acquérir des connaissances à propos de la nature des défauts qui peuvent exister dans les transistors, ainsi le principe et les mécanismes de fonctionnement des méthodes expérimentales de caractérisation de la microstructure des défauts.

En perspectives, nous envisageons de continuer les recherches dans ce contexte et de sophistication d'avantage le spectromètre et l'intégrer dans un testeur sous pointe pour permettre l'identification de la microstructure des pièges existants dans les dispositifs électroniques, sur la tranche de silicium « wafer » directement à la sortie de la salle blanche.

Références bibliographiques

[1] : 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 .

[2] : Yves Maneglia , 2004 , thèse de doctorat , Institut National Polytechnique de Grenoble , Analyse en profondeur des défauts de l'interface Si-SiO₂ par la technique du pompage de charges , 146p .

[3] : Ala AYED, 19 décembre 2014, thèse, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur spécialité : électronique, l'université de bordeaux, développement de méthodologies pour l'extraction et la construction de macro modèles d'immunité électromagnétique appliqués aux circuits intégrés, 134p.

[4] : 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.

[5] : Mireille LONTSI FOMENA, 11 décembre 2008, thèse, spécialité : physico-chimie de la matière condensée, l'université bordeaux 1 école doctorale des sciences chimiques, étude théorique de la diffusion de l'oxygène dans des oxydes diélectriques, 147p.

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

[7] : 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.

[8] : Arib , B , 18-7-2016 , mémoire , génie microélectronique , faculté MOULOUD Mammeri , Tizi-Ouzou , la technologie SOI (Silicon On Insulator) « SOI DG MOSFET » , 62p .

[9] : BENHAMIDA Y, Juin 2012, magistère, Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen, étude des caractéristiques physiques et électriques d'un MOSFET nanométrique, 115p.

[10] : Jérôme Saint-Martin, 10 Jan 2006, thèse, étude par simulation monte Carlo d'architectures de MOSFET ultracourts a grille multiple sur soi, 162p.

[11] : KEBIB A, janvier 2013, mémoire de magister, microélectronique, étude et simulations d'un transistor MOS vertical, 139p.

- [12] : JOËL REDOUTEY, troisième année CSA, les transistors à effet de champ MOS.
- [13] : 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.
- [14] : ZEDEK, R, mémoire, microélectronique, faculté MOULOUD Mammeri, Tizi-Ouzou, étude d'un transistor organique transparent avec PMMA comme isolant de grille, 84p.
- [15] : 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 .
- [16] : TAMOUM M, 24 / 02 / 2013, Thèse, caractérisation fine et modélisation Non-linéaire des transistors MOSFET, 121p.
- [17] : 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.
- [18] : Youssouf Guer, 13 Oct 2016, thèse, réalisation et caractérisation de transistors mos à base de nano fils verticaux en silicium, 165p.
- [19] : Kruno Romanjek, 1 Mars 2010, thèse, caractérisation et modélisation des transistors CMOS des technologies 50nm et en deçà, 222p.
- [20] : Louis GERRER, 7 août 2006, Thèse, Micro et nano électronique, université de Grenoble, Impact du claquage progressif de l'oxyde sur le fonctionnement des composants et circuits MOS : Caractérisation et modélisation, 159p.
- [21] : 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.
- [22] : NAAS, A, 10 décembre 2010 thèse doctorat, physique des matériaux, université D'ORLEANS, étude de l'oxyde de silicium implanté krypton ou xénon évolution de la constante diélectrique, 128p.
- [23] : Antonin Grandfond, 16 décembre 2014, Thèse, spécialité électronique, micro et nanoélectronique, optique et laser, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, Étude de 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.

- [24] : 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.
- [25] : 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.
- [3] : Djelloul-Berkane Lalia, 17/12/2008, thèse de magistère, Transport de spin dans les nanomatériaux : Application à la spintroique, Université Hassiba Benbouali-Chlef, 166p
- [27] : Denis Royer, livre, Imagerie par résonance Magnétique et Sclérose en Plaques, 17p.
- [28] : 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.
- [29] : 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.
- [30] : Duin.E, livre, Electron Paramagnetic resonance theory.
- [31] : Hervé Vezin, Nadège Ollier, Odile Majérus, Daniel Caurant, 2012, Résonance paramagnétique électronique (RPE) des terres rares: principe et apports à l'étude des verres, Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman UMR 8516, 33p.
- [32] : Emmanuel Maes, livre, la résonance magnétique nucléaire, Université des Sciences et Technologies de Lille F-59655 Villeneuve d'Ascq, 75p.
- [33] : 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.
- [34] : Turek Phillipe, Spectroscopie de résonance paramagnétique électronique, Université de Strasbourg, 48p.
- [35] : 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.
- [36] : P.Molinié, 2001, La résonance paramagnétique électronique moderne : Acrobatie de Spin, Institut des Matériaux Jean Rouxel.
- [37] : Tahanout Cherifa, 2015, Implémentation d'une plateforme de caractérisation sous champ magnétique et de la spectroscopie EDMR (Electrically Detected Magnetic resonance)
- [38] : 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.

- [39] : Chaouche Latifa, 05/2016, thèse de mastère, ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE AND MAGNETIC SUSCEPTIBILITY IN THE CuCrZrSe₄ SPINEL COMPOUND, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 45p.
- [40] : 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.
- [41] : 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.
- [42] : Yves MANEGLIA, 18/12/1998, thèse de doctorat, ANALYSE EN PROFONDEUR DES DEFAUTS DE L'INTERFACE Si-SiO₂ PAR LA TECHNIQUE DU POMPAGE DE CHARGES, Laboratoire de Physique des Composants à Semiconducteurs, 176p.
- [43] : 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.
- [44] : 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.
- [45] : 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.
- [46] : 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
- [47] : 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
- [48] : 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
- [49] : B. C. Bittel , thesis, "Study of defect structure and electrical transport in back end of line dielectrics and SiC MOSFETS," Pennsylvania State University,2012.

[50] : 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

[51] : 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 .

[52] : 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.

[53] : Hang Chang Chieh), "Advances in PID Control," edition Springer-Verlag. London, UK. ,1999

[54] : IRF 9530 Power transistor, International rectifié, datasheet

[55] : DHPCA-100 Femto, Variable-Gain High Speed Current Amplifier, datasheet.

[56] : M.L. Meade, "Lock-in Amplifiers: Principles and Applications," 1983, Peter Peregrinus Ltd., chapter 2, pp.16

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

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

[59] : Yann Weber, 23 juin 2008, thèse, Microélectronique, Université Toulouse III – Paul Sabatier, conception d'une nouvelle génération de transistor flymos vertical de puissance dépassant la limite conventionnelle du silicium, 176p.

[60] : A, GUENOUN, 2014, mémoire, génie microélectroniques, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, étude et caractérisation des transistors VDMOS de puissance sous contrainte BTS ,61p.

[61] : Donatien Martineau, 17 mars 2011, thèse, Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA Toulouse),Nanophysique,, Caractérisation de l'endommagement, de composants électroniques de puissance, soumis à des tests de vieillissement accéléré,197.