

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

**Mémoire de Fin d'Etudes  
de MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Matériaux et dispositifs électroniques  
et photovoltaïques**

*Présenté par*  
**Taleb Mounia**

**Thème**

**Contribution à l'étude de la  
spectroscopie à résonance de spin :  
application à l'identification de la  
microstructure des pièges dans Si/SiO<sub>2</sub>**

**Promoteur : M<sup>r</sup> ZIRMI Rachid  
Co-Promoteur : M<sup>r</sup> TAHI Hakim**

*Mémoire soutenu publiquement le 25 /06/ 2015*

## *Remerciements*

*Tout d'abord je remercie « le bon Dieu » le tout puissant de m'avoir donné le courage, la patience et la volonté afin de réaliser ce modeste travail et qui m'a éclairer les chemins par la lumière de son immense savoir.*

*J'exprime ma profonde gratitude à mon promoteur M<sup>r</sup> ZIRMI Rachid pour m'avoir honoré en acceptant de diriger ce travail et pour son aide, ces orientations, ces conseils, de m'avoir assisté tout de mon travail.*

*Et Qu'il me sois permis de remercier mon co-promoteur M<sup>r</sup> TAHI Hakim et M<sup>me</sup> TAHI qui ont dirigé sans relâche mon travail avec beaucoup de compétence et de patience. Qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance.*

*Je tien à exprimer mes remerciement aux personnel du « CDTA » pour leur contribution.*

*Enfin je tien à remercier tout ceux ou celles qui ont participés de près ou de loin à la réalisation de mon travail.*

# *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce mémoire :*

*A mes très chers parents ;*

*A mes sœurs : Karima, Lynda, Salima et Iman ;*

*A mes Frères : Tahar, Nassim, Oualid, Tarik ;*

*Ghani, Mezian et Hamid ;*

*A mon époux : Redouane ;*

*A mes neveux : Islam, Rayane, Yassin ;*

*A tous mes amis (es).*

*Mounia*

# Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Représentation schématique d'un spin.....	.....
<b>Figure 1.2.</b> Orientations du dipôle magnétique $\mu$ dans un champ magnétique $B_0$ pour un spin $^{1/2}$ .....	.....
<b>Figure 1.3.</b> Représente le nombre de liaisons covalentes de quelle que atome.....	.....
<b>Figure1.4.</b> Représente géométrie des molécules dans l'espace.....	.....
<b>Figure 1.5.</b> Représentation géométrique de la cellule élémentaire du silicium.....	.....
<b>Figure1.6.</b> Structure de la maille élémentaire de SiO <sub>2</sub> .....	.....
<b>Figure 1.7.</b> La structure aléatoire interne de SiO <sub>2</sub> .....	.....
<b>Figure1.8.</b> Diagramme de bandes du système Si-SiO <sub>2</sub> .....	.....
<b>Figure1.9.</b> Illustration des différents mécanismes de piégeage.....	.....
<b>Figure 1.10.</b> La Représentation schématique des défauts central E' de d'oxyde de silicium.....	.....
<b>Figure2.1.</b> Orientations des moments magnétiques nucléaires en absence et en présence d'un champ magnétique externe.....	.....
<b>Figure 2.2.</b> Le principe de fonctionnement d'EPR.....	.....
<b>Figure2.3.</b> Diagramme schématique d'un spectromètre d'ESR. ....	.....
<b>Figure 2.4.</b> Le transistor MOSFET est balayé de l'accumulation à l'inversion, on observe habituellement une crête présente a l'interface quand les nombres des trous et des électrons sont égaux.....	.....
<b>Figure 2.5.</b> Une représentation schématique du modèle de SRH.....	.....
<b>La figure2.6.</b> Le principe de fonctionnement d' SDR .....	.....
<b>Figure2.7.</b> Le diagramme schématique d' SDR .....	.....
<b>Figure2.8.</b> Des principes de base derrière SDT.....	.....
<b>Figure3.1.</b> Le montage de la technique EDMR.....	.....
<b>Figure3.2.</b> Bobines d'Helmholtz Réalisations au CDTA .....	.....
<b>Figure 3. 3.</b> Générateurs de fonction .....	.....
<b>Figure3.4.</b> Amplificateurs audio 10 W (Panasonic).....	.....
<b>Figure 3.5.</b> Bobines de Modulation 1 à 20kHz .....	.....
<b>Figure3.6.</b> le signale de modulation qui suis le signale EDMR .....	.....
<b>Figure3.7.</b> Circuit résonant.....	.....

<b>Figure 3.8.</b> capteur effet de hall.....	3.8
<b>Figure 3.9.</b> Le principe de fonctionnement d'un système d'acquisition.....	3.9
<b>Figure 3.10.</b> amplificateur de tension .....	3.10
<b>Figure 3.11.</b> Un carte son .....	3.11
<b>Figure 3.12.</b> Interfaçage LabView .....	3.12
<b>Figure 4.1.</b> Le transistor de puissance ITF9530N. ....	4.1
<b>Figure 4.2.</b> schéma illustratif d'un VDMOSFET .....	4.2
<b>Figure 4.3.</b> Structure du VDMOSFET : Vue de dessus et coupe transversale.....	4.3
<b>Figure 4.4.</b> Le transistor MOSFET est balayé de l'accumulation à l'inversion, on observe habituellement une crête présentée à l'interface quand les nombres des trous et des électrons sont égaux.....	4.4
<b>Figure 4.5.</b> Représente augmentation de courant $I_D$ en fonction de la tension $V_D$ .....	4.5
<b>Figure 4.6.</b> représente une courbe du transistor du régime d'accumulation vers le régime d'inversion.....	4.6
<b>Figure 4.7.</b> Représente la face de programme LabView.....	4.7
<b>Figure 4.8.</b> a) représente les différents signaux à l'entrée et b) la transformée de Fourier du signal précédant.....	4.8
<b>Figure 4.9.</b> le signal EDMR.....	4.9
<b>Figure 4.10.</b> La représentation de la somme des 23 signaux EDMR .....	4.10
<b>Figure 4.11.</b> le signal EDMR.....	4.11

# Sommaire

# SOMMAIRE

<i>Remerciements</i> .....	1
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Généralités</b> .....	3
<b>Introduction :</b> .....	3
<b>1.1. Définition d'un électron ;</b> .....	3
<b>1.2. Définition de spin :</b> .....	3
<b>1.2. La liaison chimique :</b> .....	5
<b>1.2.1. Liaison covalente:</b> .....	5
<b>1.2.2 Définition de la molécule :</b> .....	5
<b>1.2.3. Nombre de liaisons covalentes :</b> .....	6
<b>1.2.4. La Géométrie des molécules dans l'espace :</b> .....	6
<b>1.3. Le système Si-SiO<sub>2</sub> : propriétés physiques et électriques :</b> .....	7
<b>1.3.1. La Structure cristalline du Silicium :</b> .....	7
<b>1.3.2 La Structure cristalline du SiO<sub>2</sub> :</b> .....	8
<b>1.3.3. Propriétés électriques du SiO<sub>2</sub> :</b> .....	9
<b>1.3.3.1. Caractéristiques électriques :</b> .....	9
<b>1.3.3.1.1. Diagramme de bandes :</b> .....	9
<b>1.3.3.1.2. La Propriétés électriques de l'oxyde :</b> .....	10
<b>1.3.3.2. Le Comportement électrique des défauts :</b> .....	10
<b>1.3.3.2.1. Les niveaux d'énergie des défauts :</b> .....	10
<b>1.3.3.2.2. La Notion des pièges :</b> .....	10
<b>1.3.3.3. Les Défauts microscopiques :</b> .....	11
<b>1.3.3.3.1. La Charges fixes d'oxyde :</b> .....	12
<b>1.3.3.3.2. La Charges mobiles d'oxyde :</b> .....	12
<b>1.3.3.3.3. La Charges piégées dans l'oxyde :</b> .....	12
<b>1.3.3.3.4. La Charges piégées à l'interface Si-SiO<sub>2</sub> :</b> .....	13
<b>Conclusion :</b> .....	14
<b>Les méthodes Expérimentales</b> .....	15
<b>Introduction :</b> .....	16
<b>2. Les méthodes expérimentales :</b> .....	16
<b>2.1. La méthode EPR (Electron paramagnetic resonance):</b> .....	16
<b>2.1.1. Définition de L'EPR:</b> .....	16
<b>2.1.2 .Effet Zeeman :</b> .....	16
<b>2.1.3. Principe de fonctionnement de l'EPR :</b> .....	17

2.1.4. La Résonances :	18
2.2. La méthode ESR ( Electron spin resonance) :	19
2.2.1. Définition de l'ESR :	19
2.2.2. Description du spectromètre d'ESR :	19
2.3. La méthode EDMR (Electrically Detected Magnetic Resonance):	20
2.3.1. Définition de la méthode EDMR:	20
2.3.2. La technique DCIV :	21
2.3.3. La méthode SDR (spin-dependent recombination ):	22
2.3.3.1. Définition de l'SDR	22
2.3.3.2. Principe de fonctionnement de SDR :	23
2.3.3.3. Description de SDR :	24
2.3.4. La méthode SDT (Spin Dependent Tunneling) :	25
Conclusion :	26
La description de la technique de résonance paramagnétique de spin EDMR (SDR) Réalisations au CDTA	27
Introduction :	27
3.1. Bobine d'Helmholtz :	27
3.2. Modulation du champ magnétique :	28
3.2.1. Générateurs de fonction :	28
3.2.2. Amplificateurs audio :	29
3.2.3. Bobines de Modulation :	30
3.3. Circuit résonant :	31
3.4.1. Capteur a effet hall :	32
3.4.2. Gausse metre :	33
3.4.3. Carte d'acquisition :	33
3.5. Chaîne d'acquisition de signal EDMR :	34
3.5.1. Amplificateur de courant :	34
3.5.2. Carte son :	34
3.6. Amplificateur à détection synchrone Virtuelle (lock in) :	35
3.6.1. La détection synchrone (lock in) :	35
3.6.2. Acquisition par LabView :	35
Conclusion :	36
4 .1. Le transistor de puissance VDMOSFET:	37
4.1.1. Le principe de transistor VDMOSFET :	37
4.1.2. La structure d'un transistor VDMOSFET :	38

<b>4.2. Présentation des résultats :</b> .....	39
<b>4.2.1. Le transistor de puissance VD MOSFET :</b> .....	39
<b>4.2.2. L'interface labview :</b> .....	41
<b>4.3. Interprétation des résultats :</b> .....	43
<b>4.4. Problèmes produits :</b> .....	44
<b>4.5. Travaux futurs et perspectifs:</b> .....	44
<b>Conclusion générale:</b> .....	46
<b>Références bibliographiques.</b>	

# Introduction générale

## INTRODUCTION


En microélectronique, le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) est utilisé pour la conception de différentes sortes de films dont le rôle est de passiver (rendre inactif ou inerte) ou d'isoler (empêcher le transfert de charges) une partie du composant. Ces films sont utilisés à tous les niveaux de la conception des circuits intégrés : isolation (substrat, caisson, zone active, implantation de champ), transistor (canal, grille isolée, source et drain), interconnexions (protection du transistor, contact, métallisation)<sup>(1)</sup>.

En tant qu'oxyde de grille du transistor MOS, le film de  $\text{SiO}_2$  ainsi que l'interface qu'il forme avec le silicium jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des dispositifs. En effet, la commande de l'ouverture et de la fermeture du canal se fait par application d'un champ électrique à travers cet oxyde, tandis que la mobilité des porteurs dans le canal, ainsi que le bruit du dispositif sont directement fonction de la qualité structurale de Si- $\text{SiO}_2$ . Afin d'avoir des dispositifs fiables et performants, l'oxyde doit posséder une grande qualité structurale, un minimum de défauts d'interface et de charges fixes, mais aussi être le moins sensible possible aux pollutions et à l'injection de porteurs.

L'identification des microstructures des défauts dans la structure Si- $\text{SiO}_2$  est très importante, car elle nous permet de comprendre les mécanismes responsables de la dégradation des composants électroniques ; une fois ces mécanismes sont connus, cela nous permet d'agir sur le procédé de fabrication pour diminuer ces défauts. Des recherches dans le domaine de la caractérisation se sont donc orientées vers la résonance de spin : EPR (Electron paramagnetic resonance) ou ESR (electron spin resonance), SDR (spin-dependent recombination) et SDT (spin dependent tunneling), pour une identification et une étude de la structure des espèces paramagnétiques des solides. La résonance magnétique électriquement détectée (EDMR) permet d'observer un "défaut" dans un solide et de déterminer sa concentration. Cette spectroscopie permet d'avoir des informations sur la structure géométrique de défaut et la symétrie de son environnement, ainsi que sur sa structure électronique.

Ce mémoire a pour but d'apporter une contribution dans le domaine de la résonance paramagnétique pour l'identification des défauts atomique de Si- $\text{SiO}_2$ , pour une meilleure connaissance de l'origine physique des défauts et ainsi l'amélioration de la qualité des dispositifs et leur performance.

Nous avons ainsi partagé notre mémoire en quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous avons donné un aperçu sur le silicium l'dioxyde de silicium les défauts pouvant être rencontrés dans ces matériaux ainsi que des définitions pouvant aider à la compréhension des techniques de caractérisation utilisées. Le deuxième chapitre est consacré à la description des différentes méthodes paramagnétiques utilisées dans notre travail, alors que le troisième chapitre est dédié à la présentation de l'appareil EDMR réalisé par les chercheurs du CDTA et qui est utilisé dans notre travail pour la détection des défauts. Dans le quatrième chapitre nous avons présenté quelques résultats obtenus avec quelques interprétations de ceux-ci.



**Chpitre I:**

**GENERALITES**

**INTRODUCTION :**

Le premier chapitre est consacré à une brève présentation du spin et la description de la rotation d'électron autour de lui-même ainsi que la représentation de système Si-SiO<sub>2</sub> sa propriétés physico-chimiques et électriques. Nous serons amenés à considérer la nature et l'importance des défauts dans le système Si-SiO<sub>2</sub>.

**1.1. DEFINITION D'UN ELECTRON ;**

L'électron a un mouvement de rotation sur lui-même caractérisé par le nombre quantique de spin dont les valeurs propres  $\pm 1/2$  correspondent aux deux orientations que peut prendre le spin dans un champ magnétique, l'une parallèle, l'autre antiparallèle au champ. Deux niveaux énergétiques en résultent, niveaux entre lesquels des transitions peuvent être induites.

**1.2. DEFINITION DE SPIN :**

Le spin est une propriété quantique qui possède des degrés de liberté intrinsèques il ne dépend pas de sa position spatiale. La particularité du spin, c'est qu'il n'a pas d'équivalent en mécanique classique, c'est donc un concept très abstrait. Cependant, il peut être imaginé simplement comme un objet tournant sur lui-même comme une toupie.

Le spin peut être considéré comme un dipôle magnétique possédant un moment magnétique ( $\mu$ ) qui est caractérisé comme suit :  $\mu = \gamma \frac{h}{2\pi} I$

Avec le rapport gyromagnétique du noyau et  $h$  la constante de Planck.  $I$  est appelé le moment cinétique. Lorsque ce dipôle est mis en présence d'un champ magnétique statique  $B_0$ , il se met à tourner à la fréquence de Larmor  $\nu_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi}$  autour de la direction de l'axe principal de  $B_0$ .<sup>(3)</sup>

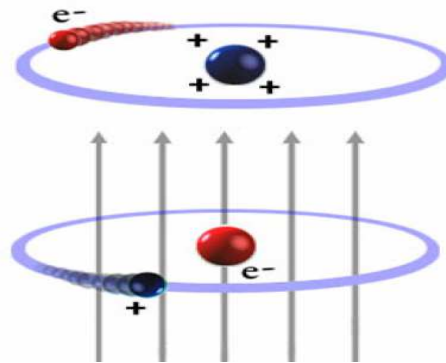


Figure 1.1. Représentation schématique d'un spin.

Ainsi, le rapport gyromagnétique peut être positif ou négatif en fonction du sens de précession du spin autour du champ magnétique. Il sera positif si le spin tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour de  $\mathbf{B}_0$  et négatif dans l'autre cas, ou simplement, en regardant le nombre de masse  $A$  et le numéro atomique  $Z$ , si ils sont simultanément pairs alors le spin est nul. Le nombre de masse et le numéro atomique permettent également de savoir si le spin est entier ou non. En effet, si  $A$  est impair le spin est un demi-entier et si  $A$  pair et  $Z$  impair alors le spin est un entier.

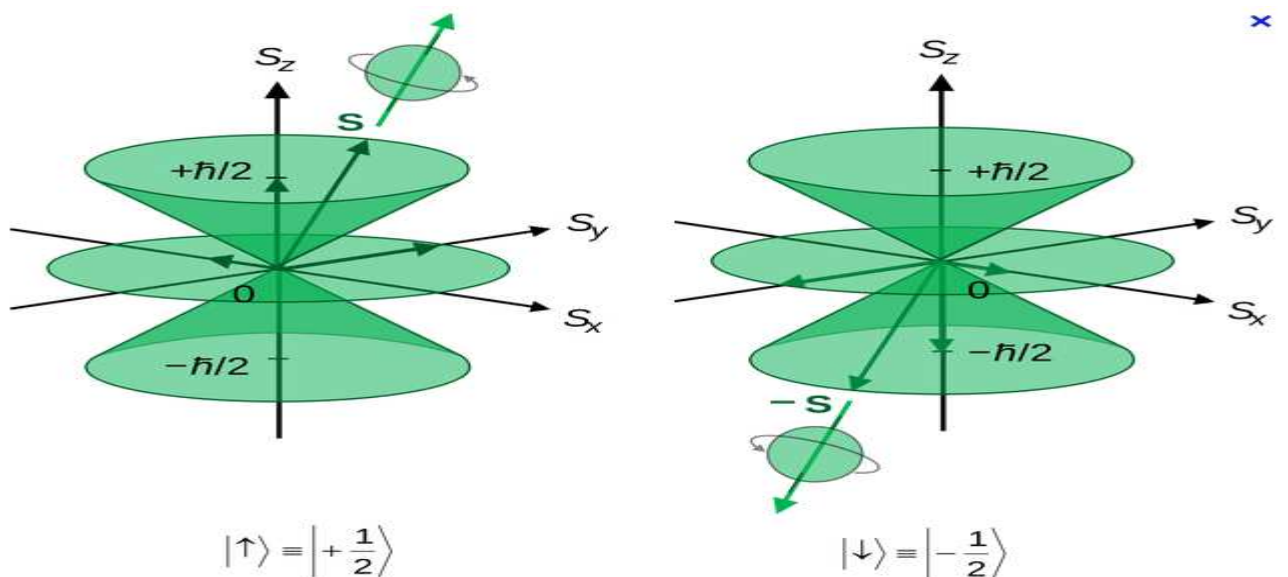


Figure 1.2. Orientations du dipôle magnétique  $\mu$  dans un champ magnétique  $B_0$  pour un spin  $1/2$ .

L'interaction entre le champ magnétique  $B_0$  et le moment magnétique de ce dipôle  $\mu$  est à l'origine de ce qu'on appelle l'effet Zeeman. Cette interaction possède une énergie potentielle qui dans l'approche classique possède la forme suivante :  $E_z = -\mu \cdot B_0$ .

## 1.2. LA LIAISON CHIMIQUE :

### 1.2.1. LIAISON COVALENTE:

Les électrons de valence d'une molécule sont les électrons de valence des atomes qui la constituent. Au XX<sup>ème</sup> siècle, le chimiste américain Gilbert Lewis (1875-1946) a proposé un modèle de partage d'une paire d'électrons pour interpréter la liaison covalente entre deux atomes. La formule de Lewis d'une molécule est la représentation des atomes qui la constituent et de ses électrons de valence regroupés en double sont représentés par des tirets.

### 1.2.2. DEFINITION DE LA MOLECULE :

Une molécule est un assemblage électriquement neutre d'atomes à la géométrie bien définie de la plus simple (dihydrogène) à la plus complexe (protéine), c'est la liaison covalente qui associe les atomes.

Une liaison covalente entre deux atomes est assurée par la mise en commun de deux électrons de valence des atomes ; la liaison est symbolisée par un tiret, qui représente le double d'électrons de valence mis en commun, appelée double liant. Par exemple, dans la formule de Lewis de la molécule d'eau, deux liaisons covalentes O-H sont représentées. Les points rouges représentent les électrons de valence.



Les électrons de valence qui ne sont pas engagés dans les liaisons covalentes sont regroupés en double non liants.



En observant plusieurs formules de Lewis, on constate qu'à l'exception de l'hydrogène, les atomes sont toujours entourés de quatre doubles d'électrons de valence : cet ensemble de huit électrons est appelé « octet », et l'observation confirme une règle appelée règle de l'octet.

Les éléments des périodes 2 et 3 de la classification périodique sont entourés de quatre double d'électrons de valence, soit huit électrons de valence, comme le néon ((K) 2 (L) 8) et l'argon ((K) 2 (L) 8 (M) 8), deux gaz nobles chimiquement inertes.

### 1.2.3. NOMBRE DE LIAISONS COVALENTES :

Prenons l'exemple de l'atome d'oxygène. Nous avons vu que cet atome forme deux liaisons covalentes et est entouré de deux doubles non liants. Or, l'oxygène possède 6 électrons de valence : il lui manque donc 2 électrons pour être entouré d'un octet. Voilà pourquoi il établit 2 liaisons covalentes et conserve 4 électrons sous forme de 2 doubles non liants. Ce type de raisonnement peut être mené pour les autres atomes.

Atome	Nombre de liaisons covalentes
H•	1
•C•	4
•N•	3
•O•	2

Figure 1.3. Représente le nombre de liaisons covalentes de quelle que atome.

### 1.2.4. LA GÉOMÉTRIE DES MOLÉCULES DANS L'ESPACE :

La géométrie d'une molécule peut être prévue à partir de sa formule de Lewis : autour d'un atome, les doubles chargés négativement se repoussent et adaptent des directions qui leur permettent d'être éloignés au maximum les uns des autres (théorie VSEPR, Valence Shell Electron Pairs Répulsion) ; la géométrie des doubles d'un atome dépend du nombre de liaison et de doubles non liants entourant l'atome. Une fois les directions des doubles déterminées, il faut positionner les atomes aux extrémités des liaisons.

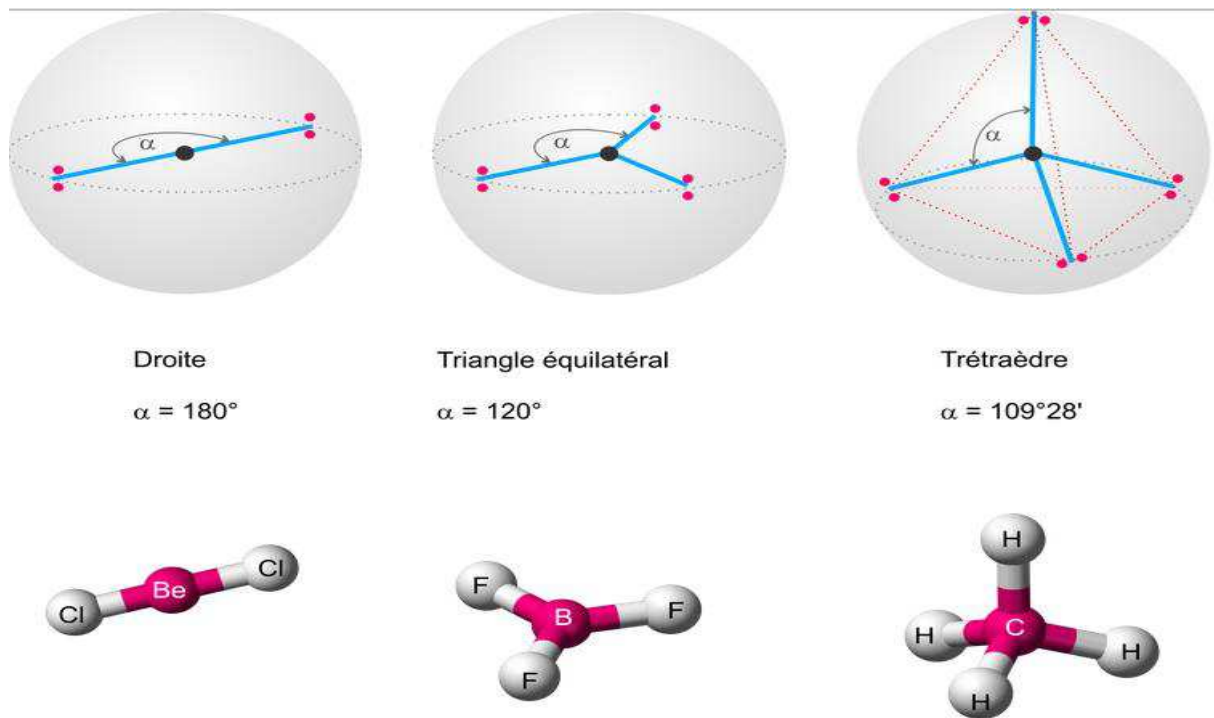


Figure 1.4. Représente géométrie des molécules dans l'espace.

### 1.3. LE SYSTEME Si-SiO<sub>2</sub> : PROPRIETES PHYSIQUES ET ELECTRIQUES :

#### 1.3.1. LA STRUCTURE CRISTALLINE DU SILICIUM :

Le silicium est un élément présent dans la nature sous forme de dioxyde de silicium. Il n'existe pas dans la nature sous forme pure. Il est obtenu par des procédés chimiques à partir de la silice. Le cristal de silicium présente la structure du diamant, c'est-à-dire deux réseaux CFC (cubique à faces centrées) intercalés. La figure 1.5) présente la cellule élémentaire du silicium. Chaque atome de silicium est lié à quatre autres atomes par des liaisons covalentes. La largeur de la bande interdite est de 1.1 eV à température ambiante.

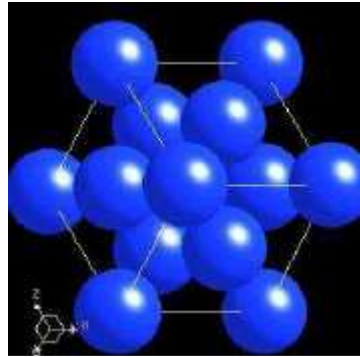


Figure 1.5. Représentation géométrique de la cellule élémentaire du silicium.<sup>(1)</sup>

### 1.3.2 LA STRUCTURE CRISTALLINE DU SiO<sub>2</sub> :

La structure atomique de SiO<sub>2</sub> a fait l'objet de nombreuses études. Parmi les modèles, le plus généralement admis est celui du "réseau continu désordonné".

Dans ce modèle, chaque atome de silicium est entouré d'un tétraèdre d'atomes d'oxygène pratiquement rigide, et chaque oxygène est lié à deux atomes de silicium comme dans la structure cristalline. La nature amorphe de ce matériau est donnée par l'orientation aléatoire des liaisons.

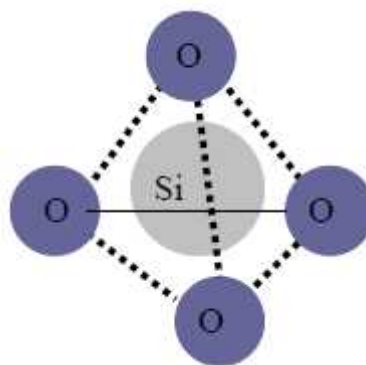
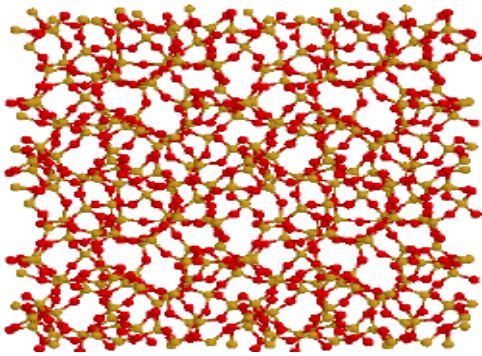


Figure 1.6. Structure de la maille élémentaire de SiO<sub>2</sub>.<sup>(1)</sup>

La distance entre les atomes de O et de Si est de 1.61 Å avec des petites variations. Les angles de liaisons Si-O-Si présentent une variation, amenant une répartition aléatoire des tétraèdres SiO<sub>4</sub>. Habituellement, cet angle est de 145°, mais il peut varier entre 100° et 170°. Ces tétraèdres enchaînent des réseaux désordonnés, caractérisés par une distribution des tailles de cycles fermés –Si-O-Si-O- contenant 3 à 8 atomes de Si.<sup>(1)</sup>



- Chaque atome de Si a quatre liaisons avec des atomes d'O
- Chaque atome d'O a deux liaisons avec des atomes de Si

Figure 1.7. La structure aléatoire interne de  $\text{SiO}_2$ .<sup>(1)</sup>

### 1.3.3. PROPRIETES ELECTRIQUES DU $\text{SiO}_2$ :

#### 1.3.3.1. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES :

##### 1.3.3.1.1. DIAGRAMME DE BANDES :

Un diagramme de bandes représente les états d'énergie permis des électrons. La théorie des bandes repose sur celle des orbitales atomiques. Ce diagramme est représenté ci dessous

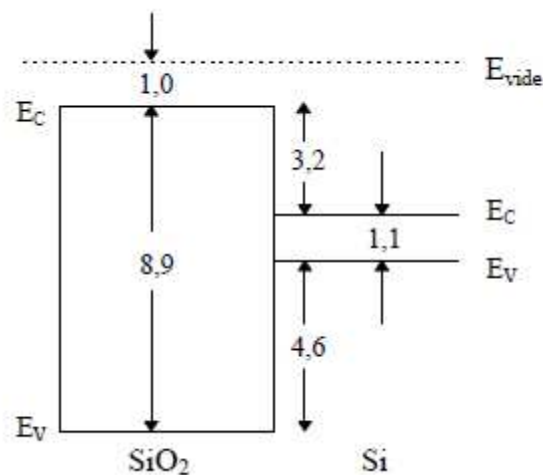


Figure 1.8. Diagramme de bandes du système Si- $\text{SiO}_2$ .

A partir de ce diagramme on constate que la largeur de la bande interdite de l'oxyde est relativement importante (environ 8,8 eV contre 5,1 eV pour le nitrure de silicium, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), ce qui est à l'origine du caractère isolant du SiO<sub>2</sub>. Les valeurs des hauteurs de barrière vues par les porteurs sont élevées : 3,2 eV pour les électrons et 4,6 eV pour les trous. L'oxyde est donc assez bien protégé contre les injections de porteurs, en particulier de celle des trous. C'est ce que confirment les expériences de séparation de porteurs dans le SiO<sub>2</sub>.

### **1.3.3.1.2. LA PROPRIETES ELECTRIQUES DE L'OXYDE :**

La résistivité élevée de l'oxyde (de l'ordre de 10<sup>15</sup> à 10<sup>16</sup> Ω.cm), confirme sa propriété d'isolant électrique. La mobilité des porteurs dans le SiO<sub>2</sub> thermique et à la température ambiante, est de 10 à 20 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> pour les électrons et de l'ordre de 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> pour les trous. Ces valeurs sont très nettement inférieures à celles généralement rencontrées dans le silicium cristallin (typiquement 1400 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> pour les électrons, et 400 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> pour les trous).

### **1.3.3.2. LE COMPORTEMENT ELECTRIQUE DES DEFAUTS :**

#### **1.3.3.2.1. LES NIVEAUX D'ENERGIE DES DEFAUTS :**

Les défauts entraînant une perte locale de la périodicité du réseau, introduisant des niveaux d'énergie supplémentaires qui peuvent se situer à l'intérieur de la bande interdite du SiO<sub>2</sub>. Si le porteur (électron ou trou) est faiblement lié au défaut, alors le niveau d'énergie associé E<sub>T</sub> est proche de E<sub>C</sub> dans le cas d'un électron, ou de E<sub>V</sub> dans le cas d'un trou. Ce défaut est qualifié de " peu profond " ou d'état de " queues de bandes ". Si au contraire, le porteur se retrouve fortement lié au défaut, alors le niveau E<sub>T</sub> est situé loin de E<sub>C</sub> et E<sub>V</sub>, c'est-à-dire relativement proche du milieu de la bande interdite. On qualifie ce défaut de " Profond".

#### **1.3.3.2.2. LA NOTION DES PIEGES :**

Les défauts qui introduisent des niveaux d'énergie à l'intérieur de la bande interdite de l'oxyde sont électriquement actifs, car assimilables à des puits de potentiel capables de capturer des porteurs. Un défaut peut se comporter comme un lieu de piégeage s'il capture un porteur de la bande de conduction (ou de valence) et le remet ensuite vers cette même bande, ou comme un lieu de recombinaison s'il peut échanger des porteurs avec les bandes de conduction et de valence. Les différents mécanismes de piégeage possibles sont illustrés sur la

figure 1.9) Selon l'état de sa charge, un piège peut être accepteur ou donneur. Dans le premier cas il est chargé négativement s'il est occupé par un électron et neutre s'il est vide. Dans le second cas il est neutre s'il est occupé par un trou et chargé positivement s'il est vide.

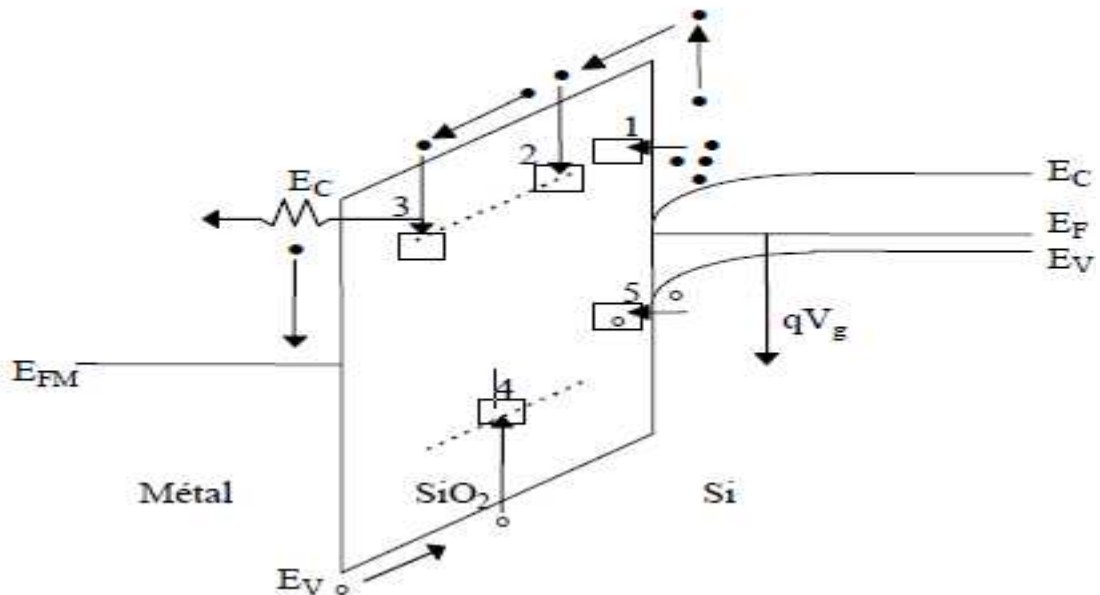


Figure 1.9. Illustration des différents mécanismes de piégeage.<sup>(2)</sup>

- 1 : Transition tunnel d'un électron de puis la bande de conduction du Si.
- 2 : Capture non radiative d'un électron de la bande de conduction du SiO<sub>2</sub>.
- 3 : Capture radiative d'un électron de la bande de conduction du SiO<sub>2</sub>.
- 4 : Capture d'un trou de la bande de valence du SiO<sub>2</sub>.
- 5 : Transition tunnel d'un trou depuis la bande de valence du Si.

### 1.3.3.3. LES DEFANTS MICROSCOPIQUES :

Les atomes présents dans le réseau cristallin d'un matériau peuvent quitter leurs places habituelles s'ils reçoivent une quantité d'énergie suffisante. L'éjection d'un atome de sa place régulière donne naissance à un défaut ponctuel. Les défauts ponctuels (l'oxygène non pontant, le radical peroxyde et les centres E' sont des défauts équivalents aux défauts Frenkel dans un cristal. Les défauts de ce type sont des centres paramagnétiques qui ont été mis en évidence par Résonance Paramagnétique Electronique (EPR).

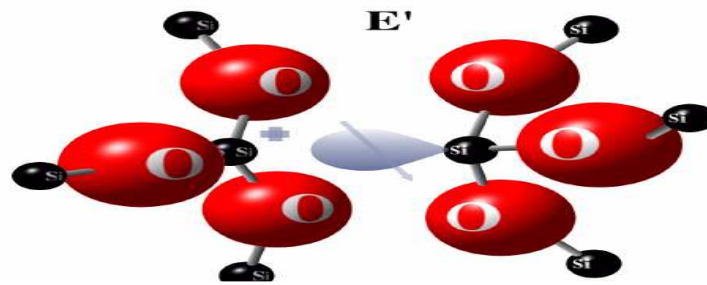


Figure 1.10. La Représentation schématique des défauts central E' de d'oxyde de silicium.<sup>(4)</sup>

L'oxygène non pontant est un atome d'oxygène avec une liaison non satisfaite. Le centre E' est une lacune d'oxygène positive dans laquelle un e- est localisé sur l'orbital  $sp^3$  d'un silicium lié à trois atomes d'oxygène. Dans le cas du radical peroxyde, un électron célibataire est localisé sur deux atomes d'oxygènes.

#### 1.3.3.3.1. LA CHARGES FIXES D'OXYDE :

Ces charges sont liées aux défauts de structure dans la zone de raccordement des mailles cristallines de silicium et de l'oxyde de silicium créés pendant les étapes de fabrication. La densité de cette charge dépend du processus d'oxydation thermique : La température, les conditions de refroidissement et orientation du silicium. Les charges sont généralement positives, localisées près de l'interface à environ  $25 \text{ \AA}$  et elles ne sont pas influencées par les conditions de polarisation lors du fonctionnement du transistor MOS.

#### 1.3.3.3.2. LA CHARGES MOBILES D'OXYDE :

Elles sont dues essentiellement aux impuretés ioniques dans l'oxyde, comme le sodium, le potassium, le lithium. Ces ions alcalins sont induits dans l'oxyde lors des différentes étapes technologiques. Ils se déplacent lentement dans l'oxyde et leur mouvement dépend du champ électrique et de la température. Une tension positive provoque un déplacement de ces ions vers l'interface, alors qu'une tension négative les attire vers la grille. Un courant dû à ce mouvement est observé. L'effet de cette charge peut être minimisé à l'aide de la technique utilisant des couches de masque tel que le nitrure de silicium.

#### 1.3.3.3.3. LA CHARGES PIEGEES DANS L'OXYDE :

Les charges piégées dans l'oxyde sont associées aux défauts de l'oxyde de grille  $\text{SiO}_2$ . Les pièges d'oxyde sont en général électriquement neutres et ils se chargent par l'injection

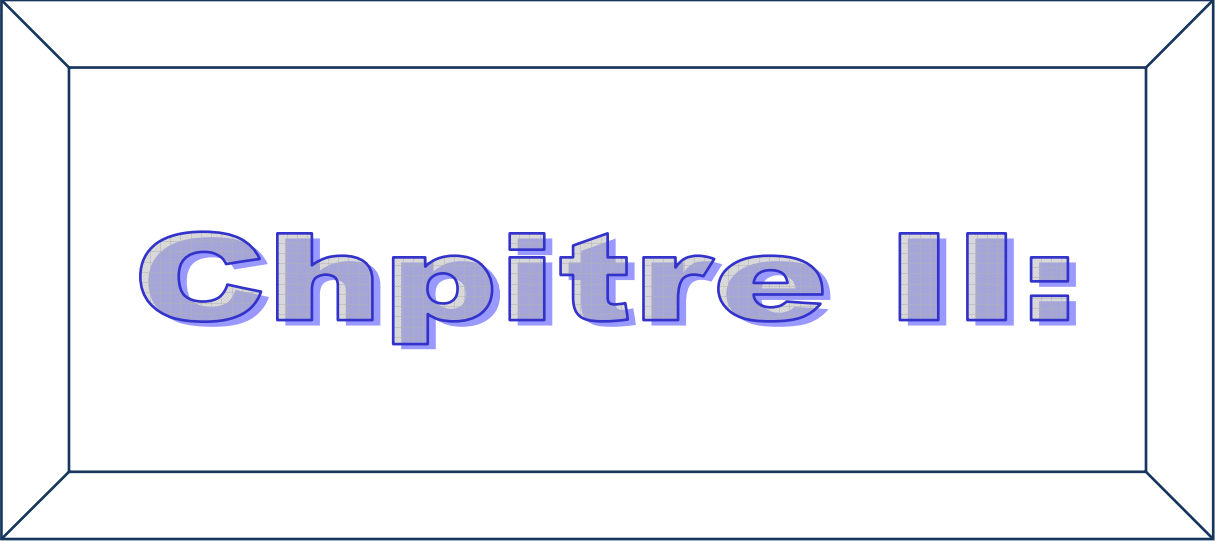
d'électrons ou de trous dans l'oxyde. Ce phénomène est déclenché par les porteurs chauds, l'injection par avalanche, les radiations ionisantes ou les courants élevés dans l'oxyde.

#### **1.3.3.3.4. LA CHARGES PIEGEES A L'INTERFACE SI-SiO2 :**

Les charges piégées à l'interface Si-SiO<sub>2</sub> sont dues généralement à la rupture de la périodicité du réseau cristallin, au procédé d'oxydation, aux impuretés métalliques ou encore à des défauts causés par des rayonnements ionisants ou par des porteurs chauds. La densité de défauts d'interface varie en fonction de l'injection des porteurs dans l'interface Si-SiO<sub>2</sub>. La densité de la charge piégée à l'interface dépend également des tensions de polarisation. L'augmentation de cette charge entraîne une variation de la tension seuil du transistor et une réduction de la mobilité ce qui conduit à une dégradation importante des performances.

**CONCLUSION :**

L'identification des microstructures des défauts dans Si-SiO<sub>2</sub> est très importante pour comprendre les mécanismes responsables de la dégradation des composants électroniques, une fois ces mécanismes sont connues, elle nous permet d'agir sur le procédé de fabrication pour diminuer ces défauts.



**Chpitre II:**

**LES METHODES EXPERIMENTALES**

**INTRODUCTION :**

Le second chapitre porte sur la description des techniques de caractérisation de la spectroscopie à résonance paramagnétique : EPR (Electron Paramagnetic Resonance) ou ESR (Electron Spin Resonance ), EMDR (Electrically Detected Magnetic Resonance) et SDR (Spin-Dependent Recombination) et SDT (Spin Dependent Tunneling) qui sont utilisées pour l'identification de défaut responsable dans la dégradation d'un dispositif électronique.

**2. LES METHODES EXPERIMENTALES :****2.1. LA MÉTHODE EPR (ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE):****2.1.1. DEFINITION DE L'EPR:**

L'EPR (La résonance paramagnétique électronique) permet une identification et une étude de la structure des espèces paramagnétiques des solides ou des matériaux fonctionnels : par exemples semi-conducteurs, oxydes mixtes...

Il est possible d'observer un "défaut" dans un solide, de déterminer sa concentration. Dans ce cadre, cette spectroscopie permet d'avoir des informations sur la structure géométrique du défaut, la symétrie de son environnement, ainsi que sur sa structure électronique. Le spectre EPR et sa structure sont liés à tous les champs magnétiques locaux autour de l'électron et en particulier au champ magnétique des noyaux autour de l'électron. Cela permet donc d'avoir des informations sur l'environnement. L'EPR est un puissant moyen d'investigation des systèmes paramagnétiques, c'est-à-dire ayant des électrons non appariés tels que des métaux de transition etc. Les renseignements fournis par l'EPR concernent la structure électronique et géométrique des systèmes étudiés, leur comportement dynamique, les mécanismes de réaction, etc.

**2.1.2 .EFFET ZEEMAN :**

Dans un échantillon macroscopique, un grand nombre de noyaux coexistent. On peut considérer qu'ils sont orientés de manière totalement statistique et sont animés d'un mouvement aléatoire par l'agitation thermique. Lorsque l'échantillon est plongé dans un champ magnétique externe intense ( $B_0$ ), les moments magnétiques nucléaires s'orientent dans la direction de ce champ. Toutefois, l'agitation thermique contrarie cette orientation. Les moments magnétiques de spin  $\frac{1}{2}$  ne peuvent adopter que deux orientations possibles, l'une

sensiblement parallèle à  $B_0$  et l'autre sensiblement antiparallèle. Le nombre de noyaux parallèles est légèrement supérieur à celui des noyaux antiparallèles, la somme vectorielle de tous les moments magnétiques nucléaires est alors non-nulle et dirigée dans la direction du champ  $B_0$ .

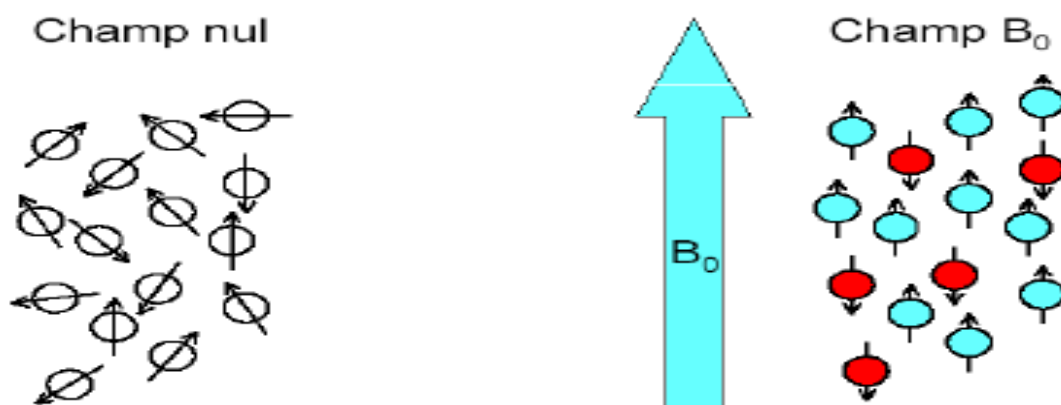


Figure 2.1. Orientation des moments magnétiques nucléaires en absence et en présence d'un champ magnétique externe.<sup>(5)</sup>

### 2.1.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'EPR :

L'EPR est une technique analytique qui utilise les électrons dépareillés pour fournir des informations chimiques et physiques au sujet d'un centre paramagnétique. Quand on place un échantillon dans un grand champ magnétique, les électrons parallèles et antiparallèles au champ magnétique appliqué vont s'aligner magnétiquement. L'orientation des électrons (parallèles ou antiparallèles) correspond à deux forces connues sous le nom d'effet Zeeman. La différence d'énergie entre les niveaux de Zeeman augmente linéairement avec l'augmentation de la force de champ magnétique à mesure que représentée sur la figure 2.2. Dans l'EPR, une onde est appliquée à l'échantillon. Quand l'énergie de l'onde égale la différence d'énergie ( $\Delta E$ ), la résonance se produit. Pendant la résonance, un électron va renverser son vecteur de rotation avec son moment magnétique de rotation. La résonance est détectée en enregistrant la puissance réfléctée de l'onde qui surveille le changement net de l'énergie de la rotation de l'électron "renversant". La différence d'énergie ( $\Delta E$ ):

$$h\nu = g\beta B_0$$

Où  $h$  est la constante de Planck, le  $\nu$  est la fréquence du champ magnétique, la  $g$  est la valeur libre de l'électron  $g \approx 2,002319$ ,  $\beta$  est le magnéton de Bohr, et  $H$  est le champ magnétique externe, la force externe de champ magnétique est 3400 gauss.

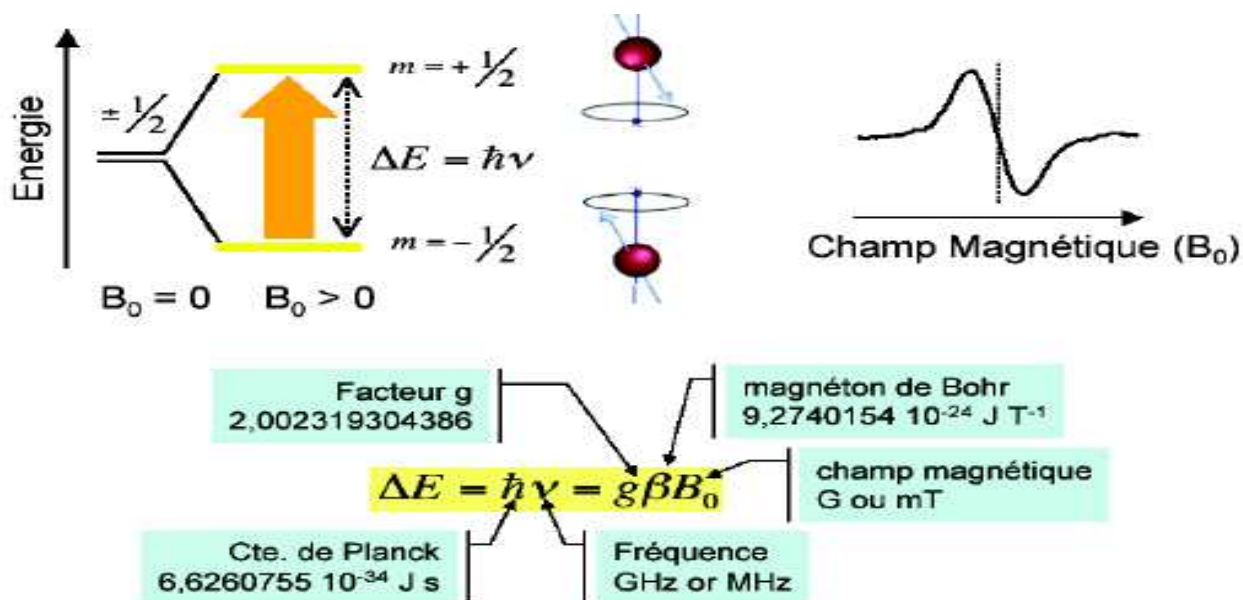


Figure 2.2. Le principe de fonctionnement d'EPR.<sup>(5)</sup>

#### 2.1.4. LA RESONANCES :

On aurait pu décrire le couplage du moment magnétique électronique avec un champ magnétique statique comme un mouvement de rotation autour de la direction du champ magnétique statique. En effet, il s'agit d'un couple en terme énergétique : celui-ci entraîne un mouvement de rotation. L'aimantation effectue autour de la direction du champ un mouvement de précession à une fréquence proportionnelle à l'intensité du champ et au rapport gyromagnétique, que l'on appelle fréquence de Larmor :  $h\nu = g\beta H_0$

Considérons un moment magnétique dans un champ magnétique statique, dans lequel sa fréquence de Larmor a une valeur bien déterminée, et ajoutons un autre champ magnétique, beaucoup plus petit, perpendiculaire au champ statique et tournant autour de lui. Si la fréquence de rotation de ce second champ est très différente de la fréquence de Larmor, l'influence de ce champ sur le mouvement de l'aimantation est négligeable. Si, par contre, ces fréquences sont égales ou très proches, le mouvement de l'aimantation est fortement perturbé.

Cette réponse sélective du système à une excitation périodique de fréquence bien déterminée constitue le phénomène de résonance. La perturbation du mouvement de l'aimantation est détectée par l'intermédiaire de la force électromotrice que cette aimantation induit dans une bobine entourant l'échantillon. Seule la composante de l'aimantation qui est perpendiculaire au champ statique appliqué, induit un signal. <sup>(3)</sup>

## **2.2. LA METHODE ESR ( ELECTRON SPIN RESONANCE) :**

### **2.2.1. DEFINITION DE L'ESR :**

L'ESR est une technique analytique qui utilise les électrons dépareillés pour fournir des informations chimiques et physiques au sujet d'un centre paramagnétique. , il est l'outil le plus puissant disponible, pour étudier la structure des centres de piégeage en structures des matériaux.

### **2.2.2. DESCRIPTION DU SPECTROMETRE D'ESR :**

Un schéma du spectromètre d'ESR est montré sur la figure 2.3. Le spectromètre se compose de trois composants principaux. Le premier est un électro-aimant, qui est employé pour appliquer le champ magnétique de polarisation qui aligne tous les électrons dépareillés dans l'échantillon à l'étude. Il est important que ce champ magnétique commandé soit extrêmement uniforme à l'approche du volume de l'échantillon. Le deuxième composant du spectromètre est le générateur à micro-ondes. Pour induire une résonance, l'échantillon à étudier doit être sujet à l'irradiation. Les micro-ondes sont produites en utilisant une source de klystron ou de diode de Gunn.

Le troisième composant du spectromètre est la cavité ou le résonateur de micro-onde. La géométrie du résonateur tient compte d'un accouplement efficace de l'irradiation de l'échantillon à soumettre à l'étude. Les mesures typiques d'ESR impliquent la bande X (irradiation 8-10 GHz) et un champ magnétique d'environ 3500 gauss. Ces composants fournissent le matériel nécessaire pour induire une résonance; cependant, la résonance doit également être détectée. Pour la détection dans l'ESR une diode de détecteur de micro-onde et un à l'amplificateur Lock-in sont nécessaires. La diode de détecteur de micro-onde est placée dans le circuit à micro-ondes et mesure la puissance réfléchie de micro-onde sortant du résonateur. Les changements de la puissance réfléchie indiquent l'absorption de micro-onde, ou la résonance. Cette absorption est surveillée en utilisant l'amplificateur Lock-in.

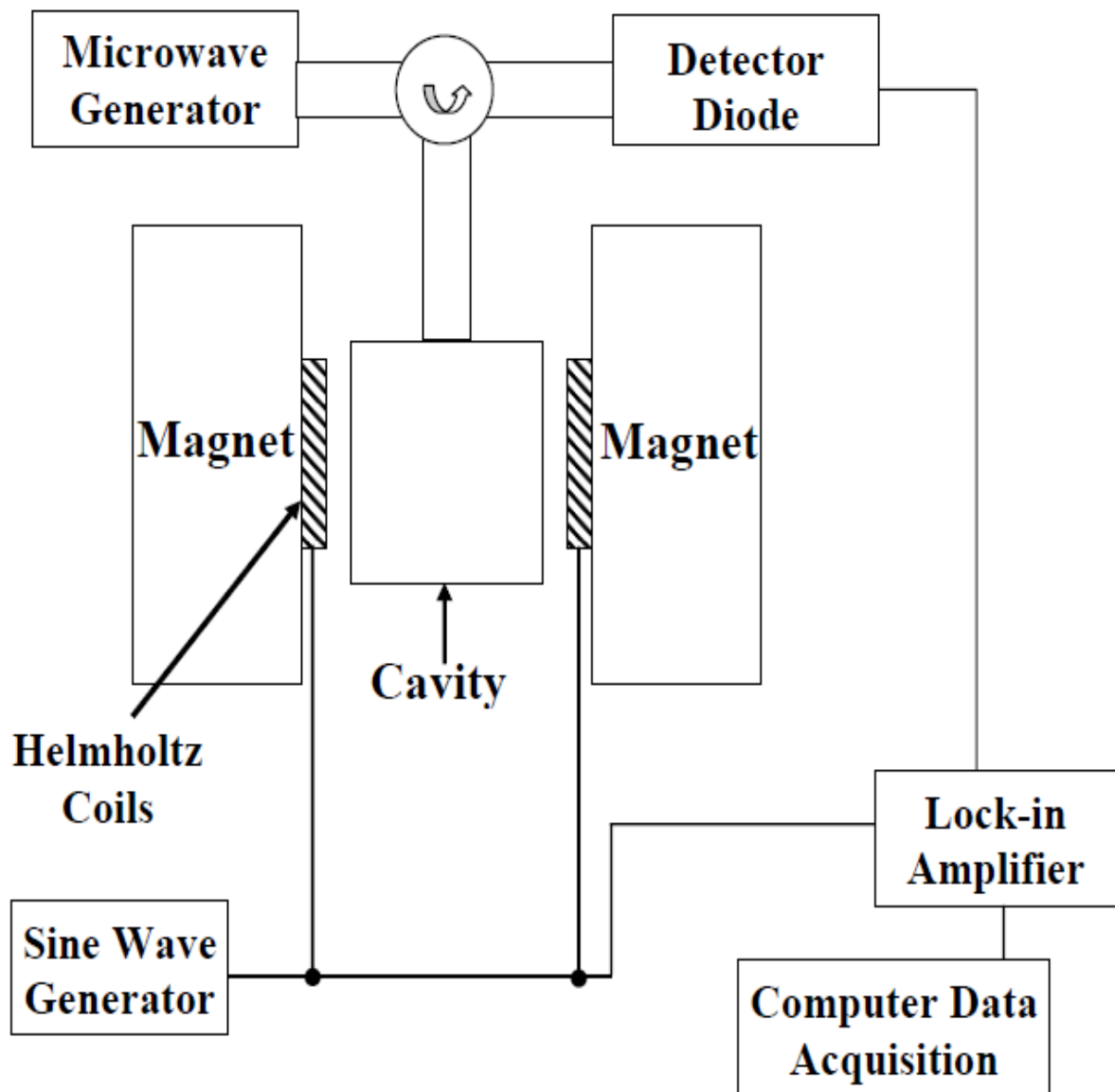


Figure 2.3. Diagramme schématique d'un spectromètre d'ESR.<sup>(6)</sup>

## 2.3. LA MÉTHODE EDMR (ELECTRICALLY DETECTED MAGNETIC RESONANCE):

### 2.3.1. DEFINITION DE LA METHODE EDMR:

La résonance magnétique électriquement détectée (EDMR), également connue sous le nom de recombinaison dépendante de rotation (SDR), est une dérivée de l'ESR qui est employée pour identifier des défauts dans des dispositifs de semi-conducteur. EDMR a une

sensibilité plus grande que celle de l'ESR et elle est capable de détecter des problèmes reliés par instabilité atomique. Au lieu de surveiller la puissance réfléctée comme dans l'ESR, EDMR est réalisé en surveillant un courant dépendant de recombinaison de rotation d'un dispositif entièrement traité. Le courant de recombinaison dans un dispositif est le courant que les formes dues a la recombinaison des électrons et des trous dans l'espace chargent la région (d'épuisement).

### 2.3.2. LA TECHNIQUE DCIV :

Ce processus de recombinaison peut être vu électriquement avec une technique appelée DCIV. DCIV est une technique de mesure à diode de gâchette (gated diode) dans laquelle la source et le drain d'un transistor MOSFET sont court-circuités et maintenues à une petite polarisation en aval (typiquement  $\sim 2,0$  V pour des dispositifs de Si). La tension de grille est alors balayée simultanément tout en surveillant le courant de substrat. Dans les transistors MOSFET à base de silicium, une crête dans le courant de substrat indique la recombinaison maximum qui se produit quand les électrons et des trous sont présents en nombres égaux à l'interface du dispositif, comme illustré sur la figure 2.4. Dans les transistors à base de silicium, la qualité du substrat de silicium est si haute que la densité la plus élevée des niveaux profonds est presque inévitablement à la frontière de Si/SiO<sub>2</sub>. L'amplitude de la crête fournit la perspicacité dans les densités de défaut cette technique est également capable de faciliter la localisation de l'endroit du défaut et peut également fournir un point d'opération pour les expériences d'EDMR.

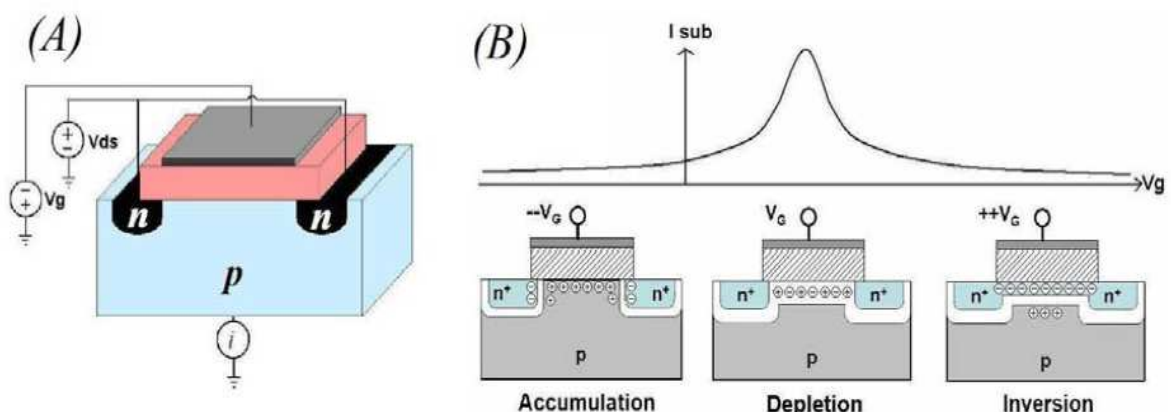


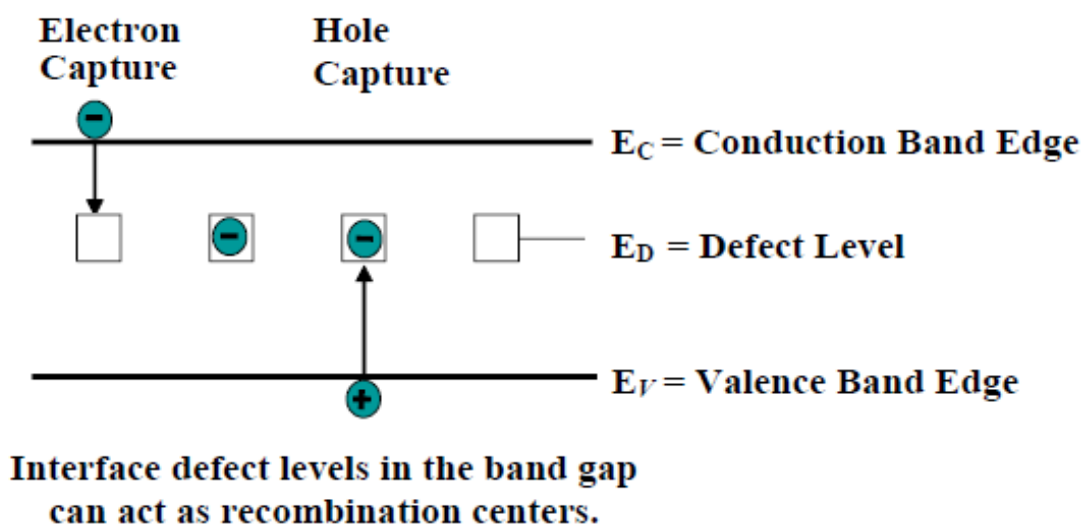
Figure 2.4. Le transistor MOSFET est balayé de l'accumulation à l'inversion, on observe habituellement une crête présente à l'interface quand les nombres des trous et des électrons sont égaux.<sup>(7)</sup>

### 2.3.3. LA MÉTHODE SDR (SPIN-DEPENDENT RECOMBINATION ):

#### 2.3.3.1. DÉFINITION DE L'SDR

Le SDR (spin-dependent recombination) est une technique démontrée par Lepine en 1972. L'ESR conventionnelle a une sensibilité d'environ  $10^{10}$  rotations totales. Heureusement, la technique SDR (qui est au moins  $10^7$  fois plus sensible que l'ESR conventionnelle).

Le SDR utilise les principes de l'ESR aussi bien que le modèle de Shockley-Read-Hall (SRH) pour la recombinaison. Dans le modèle de SRH, la recombinaison des électrons et les trous a lieu par des défauts de niveau profonds dans le band gap de semi-conducteur. Un électron est emprisonné à un défaut de niveau profond, alors un trou est emprisonné au même défaut de niveau profond. (L'ordre pourrait évidemment être renversé, avec un trou étant emprisonné d'abord à un défaut de niveau profond, puis à un électron.) Ce processus est illustré sur la figure 2.5.



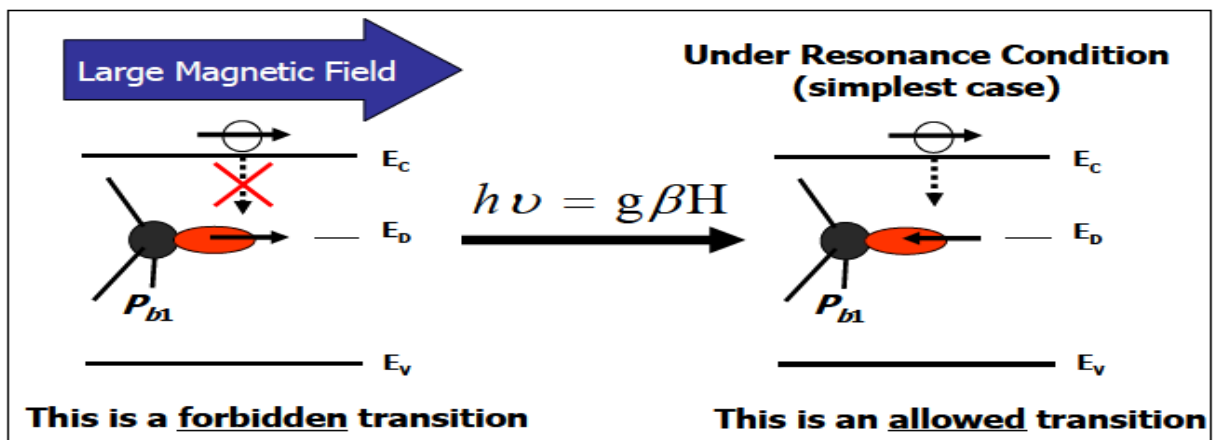
La figure 2.5. Une représentation schématique du modèle de SRH.<sup>(8)</sup>

**2.3.3.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE SDR :**

Dans le modèle **SDR** un électron de conduction est capturé par un défaut de niveau profond. Puis, l'emplacement de défaut capture un trou; l'électron et le trou recombinent et le processus peut se répéter indéfiniment (la capture de trou peut se produire d'abord).

En **SDR**, Le transistor MOSFET est placé dans un grand champ magnétique et, comme avec le cas de l'ESR conventionnel, les électrons dépareillés résidant sur des défauts de niveau profonds tendent à aligner parallèle ou antiparallèle au champ magnétique appliqué. Si un défaut de niveau profond et un électron de conduction ont le même nombre de quantum de rotation, la recombinaison ne peut pas se produire parce qu'on l'interdit par le principe d'exclusion de Pauli. Quand la condition de résonance d'ESR est satisfaite, les électrons du défaut de niveau profond " sont renversés " qui augmente la probabilité d'un électron de conduction et d'un défaut de niveau profond ayant vis-à-vis des nombres de quantum de rotation Ceci est illustrée sur la figure 2.5.

En SDR, la résonance est détectée en surveillant le changement du courant de recombinaison et l'état de résonance de SDR est identique à l'ESR conventionnel. Encore, des informations sur la structure du défaut et la chimie sont données par le facteur de g. L'avantage principal d'employer le SDR est qu'on peut effectuer des mesures d'ESR sur les dispositifs entièrement traités. Ainsi, les échantillons utilisés en SDR sont beaucoup plus technologiquement appropriés que les grands échantillons de secteur d'ESR. Avec le SDR, on peut obtenir l'information valable d'ESR et facilement les relier aux décalages de paramètre de dispositif réel.



La figure 2.6. Le principe de fonctionnement d' SDR.<sup>(8)</sup>

### 2.3.3.3. DESCRIPTION DE SDR :

La figure 2.7 montre un schéma simplifié d'un spectromètre SDR. Un transistor MOSFET est monté sur un adaptateur spécial tel qu'on puisse avoir accès à ses contacts électriques peuvent être consultés tout en étant placé dans une cavité résonnante à micro-onde.

La cavité est située dans un grand champ magnétique. Des enroulements sont montés sur la cavité qui applique un petit champ magnétique à l'échantillon et produit un balayage pour pouvoir obtenir une courbe phase/fréquence. Le courant est introduit dans un préamplificateur puis dans un amplificateur Lock-in.

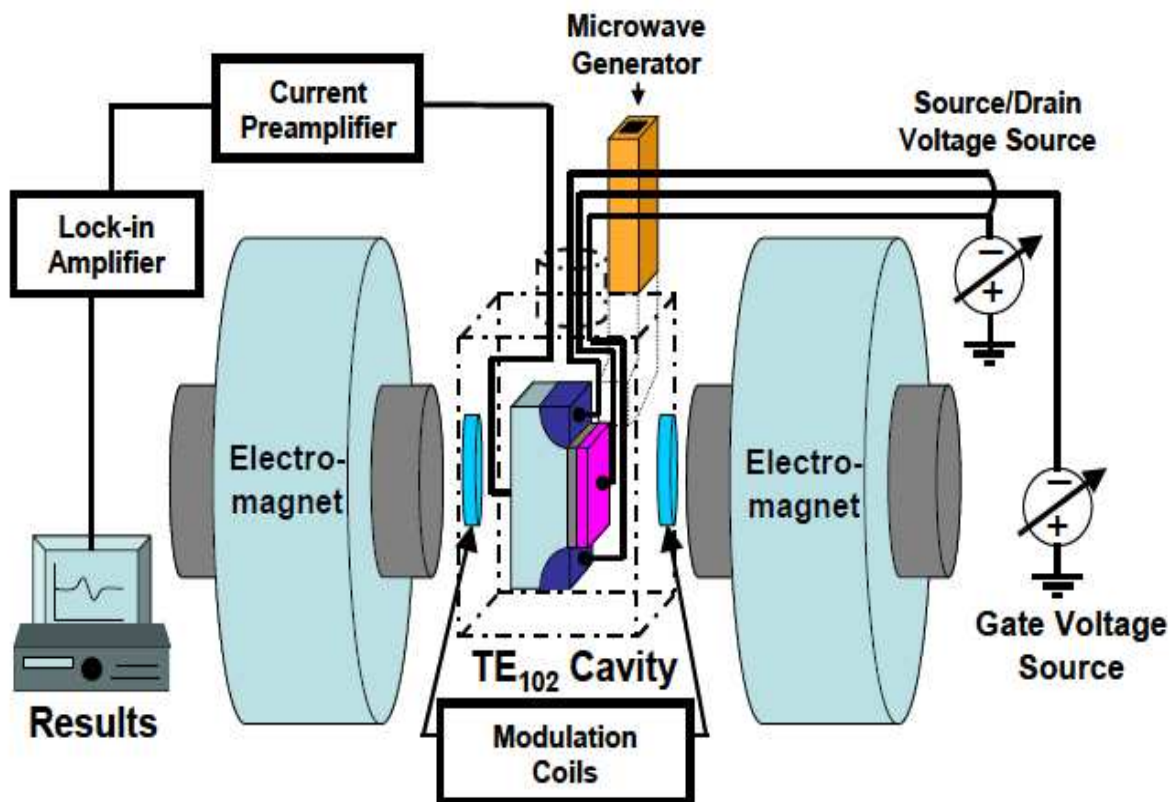


Figure 2.7. Le diagramme schématique d' SDR.<sup>(9)</sup>

### 2.3.4. LA METHODE SDT (SPIN DEPENDENT TUNNELING) :

La méthode (SDT) est très semblable au SDR, sauf qu'au lieu de surveiller le courant de recombinaison dans les MOSFETs, on surveille le courant tunnel qui traverse un diélectrique dans une structure simple de condensateur. La SDT est une technique d'identification de la nature chimique et structurale pour limiter les défauts situés dans les diélectriques. La SDT peut être expliqué qualitativement par le perçage d'un tunnel d'un électron tunnel d'un emplacement central paramagnétique à un autre dans un diélectrique fortement défectueux. Dans le modèle le plus simple pour le passage d'un électron tunnel aidé par piège, il peut tracer un chemin tunnel d'un défaut à l'autre et par la suite travailler sa voie par l'oxyde de grille. Semblable au cas du SDR, quand on applique un grand champ magnétique au système, les électrons dépareillés dans l'échantillon tendent à aligner parallèle ou antiparallèle au champ magnétique appliqué. Si l'électron de perçage d'un tunnel et le défaut d'oxyde ont le même nombre de quantum de rotation, on interdit l'événement de perçage d'un tunnel. Quand la condition de résonance d'esr est satisfaite, le défaut d'oxyde renverse son orientation de rotation, et l'événement de perçage d'un tunnel devient laissé. Ce processus est illustré sur la figure 2.8.

Dans SDT, la résonance est détectée en surveillant le courant de perçage d'un tunnel de porte en fonction du champ magnétique. Encore, l'état de résonance est décrit par l'équation  $h\nu = g\beta H_0$  et des informations sur la structure du défaut de perçage d'un tunnel sont déterminées à partir du facteur de  $g$ .

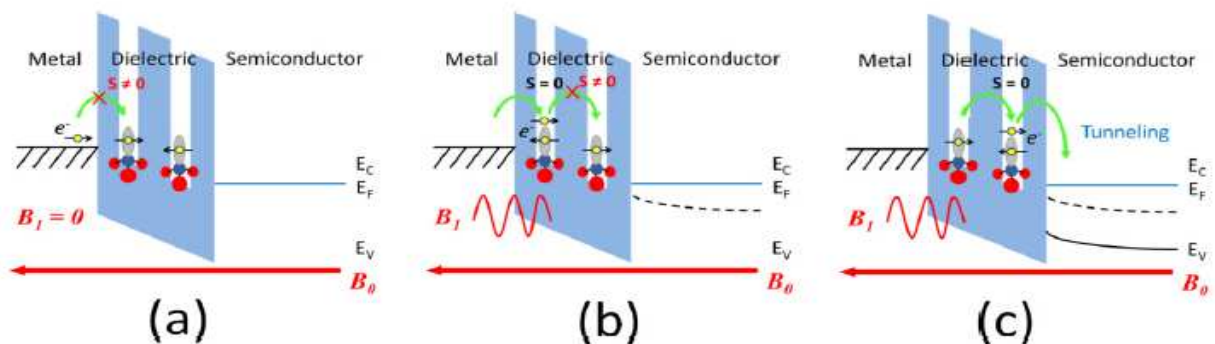


Figure 2.8. Des principes de base derrière SDT.<sup>(10)</sup>

**CONCLUSION :**

Depuis sa découverte, la Résonance Paramagnétique s'est rapidement développée et a été appliquée dans de nombreux domaines de recherche pour l'identification des défauts atomique et l'étude de la structurée centre des pièges en structure des matériaux.

# Chpitre III:

**LA DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE DE  
RESONANCE PARAMAGNETIQUE DE SPIN  
EMDR (SDR) REALISATIONS AU CDTA**

**INTRODUCTION :**

Dans ce chapitre nous allons décrire les différents matériels utilisés pour mettre en pratique la technique de résonance paramagnétique de spin « EDMR » et du bâti de caractérisation réalisée au sein du centre de développement des technologies avancées (CDTA).

Nous allons d'abord voir la modulation du champ magnétique pour induire un signal modulé afin de diminuer le bruit du signal « EDMR », puis introduire le transistor dans le circuit de résonance ainsi que l'acquisition des données exécutées par la carte d'acquisition et la carte son et le filtrage des bruits est effectué par la détection synchrone (LOCK-IN).

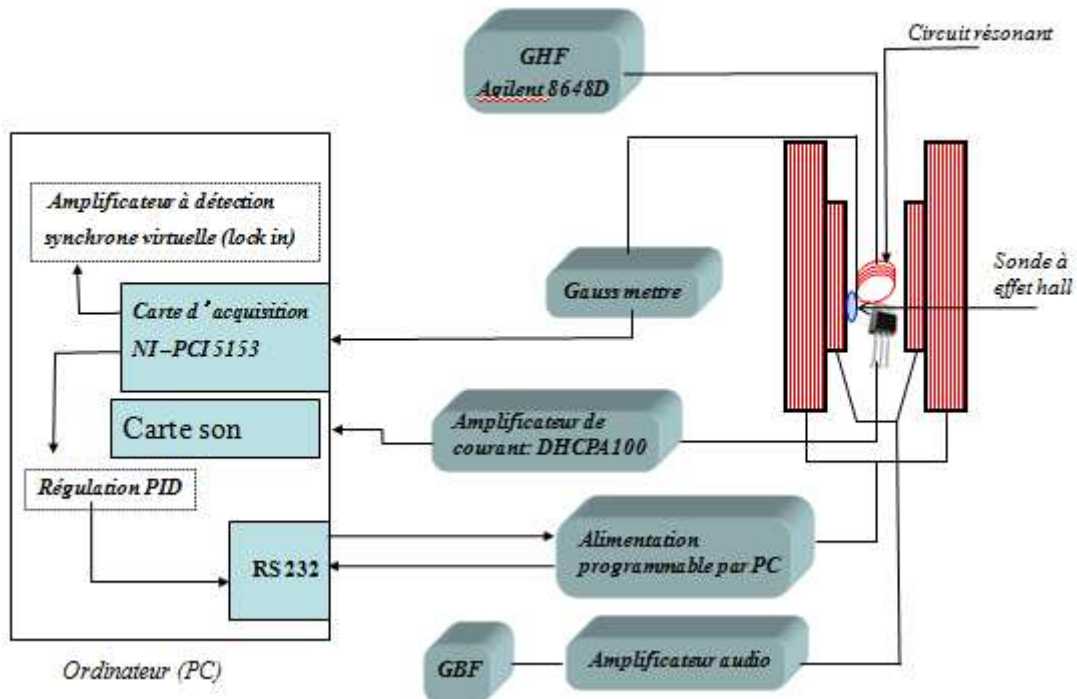


Figure3.1. Le montage de la technique EDMR

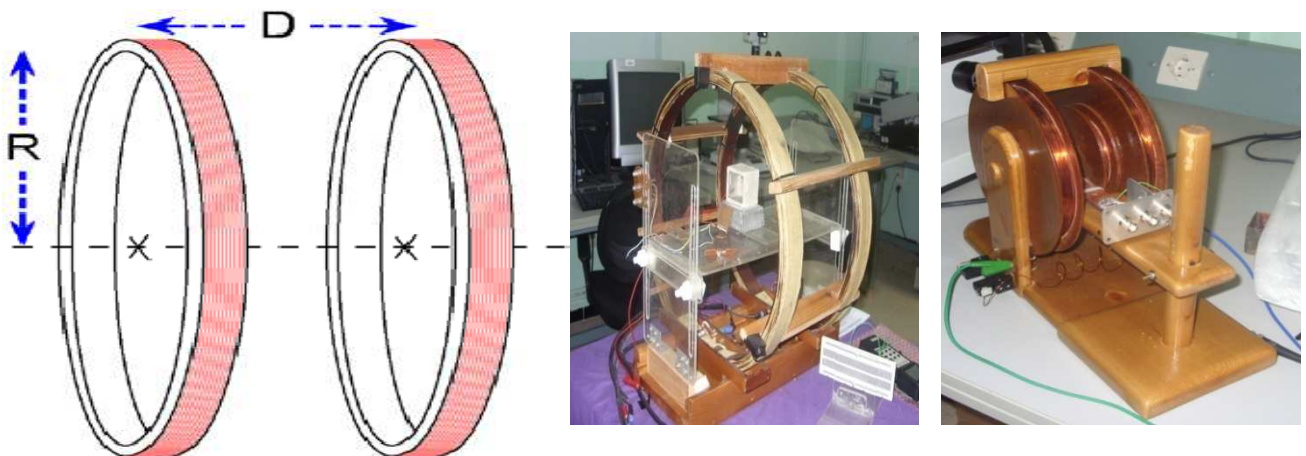
**3.1. BOBINE D'HELMHOLTZ :**

Une bobine est un enroulement de fil conducteur. Chaque tour de fil est une spire. On appelle bobines de Helmholtz l'association de deux bobines plates coaxiales séparées par une distance  $D$  égale à leur rayon commun  $R$ .

Le champ magnétique est donné par le rapport:

$$B = \frac{.899 nI}{R},$$

Où R est le rayon, n est le nombre de tours autour de chaque enroulement, I est le courant traversant les enroulements (en ampères), et B est le champ magnétique en gauss. Les enroulements de Helmholtz sont souhaitables pour des mesures d'EMDR parce qu'ils fournissent un champ magnétique très uniforme autour du point à mi-chemin entre les enroulements. EMDR utilise typiquement deux ensembles d'enroulements de Helmholtz. Les enroulements plus grands et externes fournissent le champ magnétique rapide répété. Un plus petit ensemble fournit ce qui s'appelle la modulation. On observe les plus grands signaux quand l'amplitude de modulation est égale à la largeur de crête à crête du signal.



*Figure 3.2. Bobines d'Helmholtz Réalisations au CDTA.*

## **3.2. MODULATION DU CHAMP MAGNETIQUE :**

### **3.2.1. GENERATEURS DE FONCTION :**

Un générateur de basses fréquences (GBF) est un appareil utilisé dans le domaine de l'électronique. Un GBF permet de délivrer un signal avec la fréquence désirée sous forme de sinusoïdes. De nombreux paramètres de réglage permettent de modifier la forme du signal

général on modifier la fréquence et le rapport cyclique mais aussi de modifier l'amplitude du signal.

On règle le générateur pour avoir un signal avec une impédance de sortie typique de  $50\Omega$  et une fréquence de 1KHZ et l'amplitude de 50mV et un courant de 10mA.

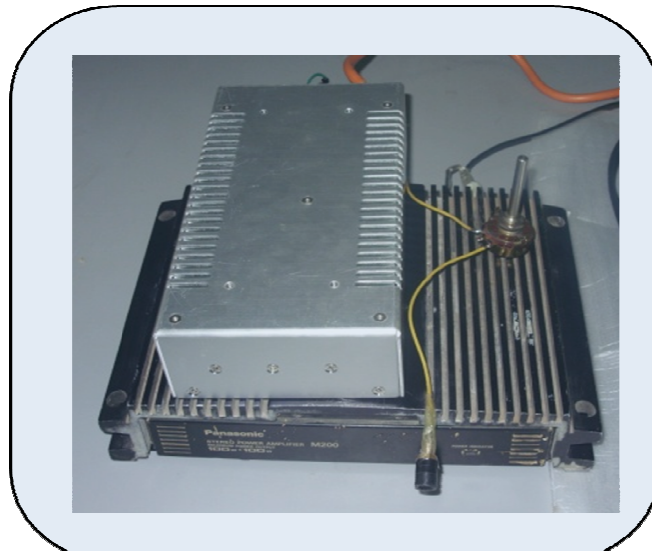


ARBITRARY WAVEFORM Generator  
TGA1241

*Figure 3. 3. Générateurs de fonction.*

### **3.2.2. AMPLIFICATEURS AUDIO :**

Un amplificateur audio est un amplificateur électronique conçu pour amplifier un signal électrique audio afin d'obtenir une puissance suffisante pour la modulation .Un amplificateur électronique utilise un ou plusieurs composants actifs (transistor) afin d'augmenter la puissance électrique du signal présent en entrée. Les composants actifs utilisés dans les amplificateurs électroniques permettent de contrôler leur courant de sortie en fonction d'une grandeur électrique (courant ou tension).



*Figure 3.4. Amplificateurs audio 10 W (Panasonic).*

### **3.2.3. BOBINES DE MODULATION :**

Des bobines secondaires servent à moduler le champ magnétique principal, le courant alternatif sinusoïdal circule dans les bobines secondaires et crée un faible champ magnétique alternatif qui s'ajoute au champ magnétique principal. Les bobines secondaires sont alimentées par le GBF. On installe un ampèremètre dans le circuit d'alimentation des bobines secondaires afin de s'assurer qu'un courant d'au moins 30mA. Les bobines secondaires devront être utilisées pour rechercher le signal d'EDMR alors que les signaux en sortie du détecteur sont visualisés directement sur détection synchronisé à la fréquence du GBF (de l'ordre de 50Hz). En modulant simultanément le champ magnétique au voisinage de la résonance, les bobines secondaires permettent de rendre la mesure cyclique, ce qui facilite beaucoup la détection de la résonance.

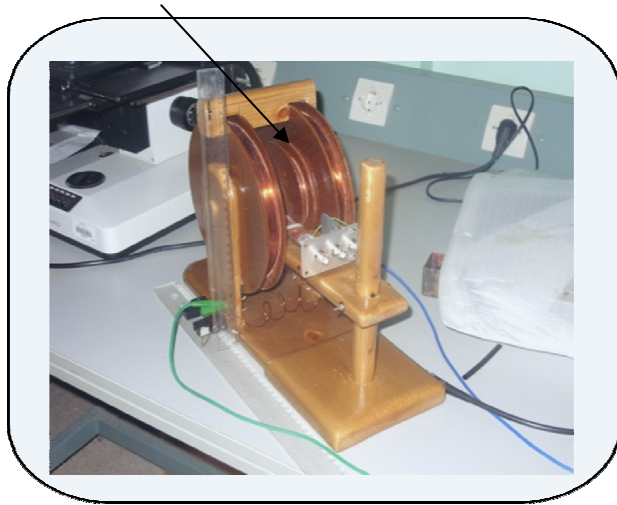


Figure 3.5. Bobines de Modulation 1 à 20kHz.

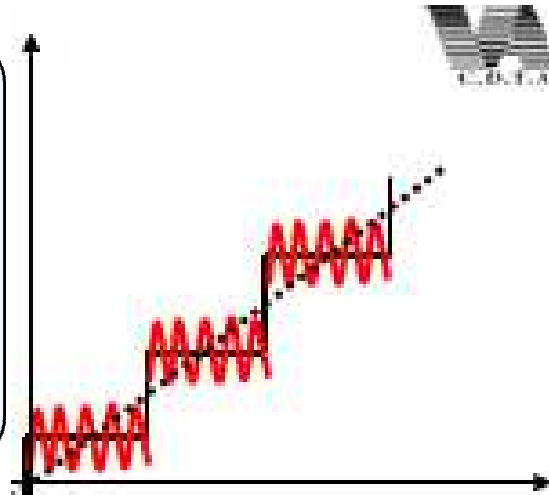


Figure3.6. le signale de modulation  
qui suis le signale EDMR.

### 3.3. CIRCUIT RESONANT :

La résonance est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques (électriques, mécaniques...) sont sensibles à certaines fréquences. Un système résonant peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme périodique, et proche d'une fréquence dite « fréquence de résonance ».

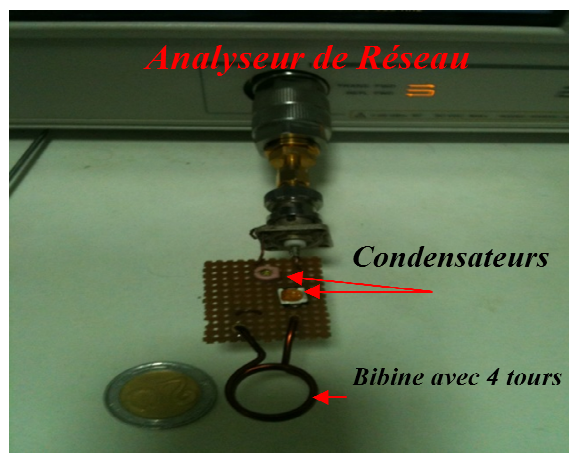
Dans un circuit composé de condensateurs et de bobines, le champ magnétique dans une bobine induit un courant électrique dans les enroulements de cette bobine pour charger un condensateur. Lorsqu'il se décharge, le condensateur produit un courant électrique qui renforce le champ magnétique dans la bobine. Ce processus est répété continuellement, de façon comparable au processus de balancement d'un pendule mécanique. Dans certains cas, la résonance a lieu lorsque les réactances de bobine et de condensateur sont de magnitudes égales, de sorte que l'énergie électrique oscille entre le champ magnétique de la bobine et le champ électrique du condensateur

La pulsation propre ou de résonance d'un circuit LC (en radians par seconde) est :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Ce qui nous donne la fréquence propre ou de résonance d'un circuit LC en hertz :

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

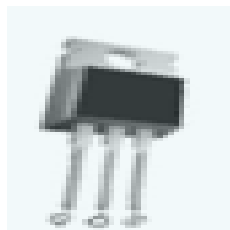


*Figure3.6. Circuit résonant.*

### **3.4. Chaîne d'acquisition de champ magnétique :**

#### **3.4.1. CAPTEUR A EFFET HALL :**

Un capteur à effet Hall permet de mesurer un champ magnétique, Il est utilisé pour détecté la variation de champ magnétique de transistor. Le dispositif à effet Hall est plat, mince et rectangulaire. Il est constitué d'un conducteur ou semi-conducteur.



**VGN335**

*Figure3.7. capteur effet de hall.*

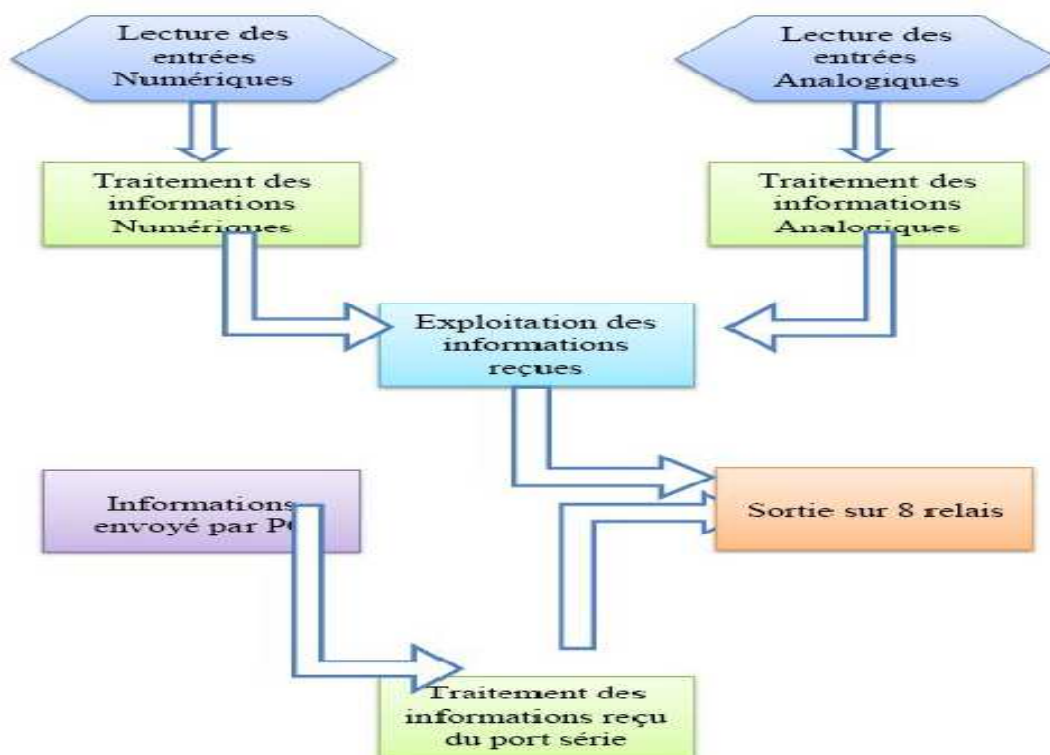
### **3.4.2. GAUSSE METTRE :**

Un gauss mettre est un appareille qui ai utilise pour mesuré le champ électromagnétique a la sorti de capteur a effet hall. Le gaussmètre électronique sensible a de nombreux usages. On mesurer avec le gaussmètre le champ magnétique en Gauss / Tesla. En particulier, avec une fréquence de 50 Hz.

### **3.4.3. CARTE D'ACQUISITION :**

Les cartes universelles d'acquisition permettent de réaliser des applications d'acquisition et de contrôle de processus, L'acquisition de données consiste à enregistrer des signaux physiques sur un support numérique. Le principe de fonctionnement d'un système d'acquisition est représenté sur la Figure 8.3.

Une carte d'acquisition se trouve dans le PC. Elle assure la conversion des signaux analogiques (les tensions) et signaux digitaux (les nombres), la carte d'acquisition à 8 entrées analogiques et 8 entrées Logiques et 8 sorties à relais



*Figure 3.8. Le principe de fonctionnement d'un système d'acquisition.*

### **3.5. CHAINE D'ACQUISITION DE SIGNAL EDMR :**

#### **3.5.1. AMPLIFICATEUR DE COURANT :**

Un amplificateur de courant est un système électronique augmentant la tension et l'intensité d'un signal électrique. L'énergie nécessaire à l'amplification est tirée de l'alimentation du système. Un amplificateur parfait ne déforme pas le signal d'entrée : sa sortie est une réplique exacte de l'entrée mais d'amplitude majorée.

On a utilisé deux amplificateurs à basse fréquence qui nous permettront d'élever le signal électrique à la sortie du capteur à effet de hall, vers un niveau de tension exploitable d'environ  $10^8$  de gain d'amplification. L'alimentation des deux amplificateurs est indépendante du signal d'entrée et de sortie.



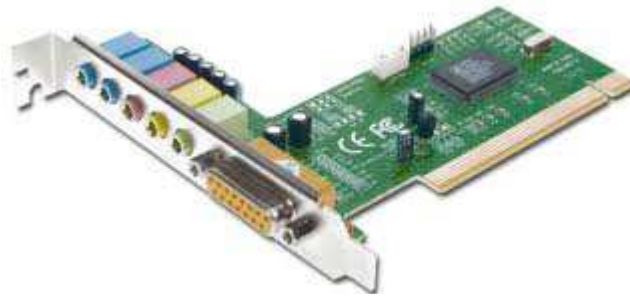
Amplificateur à gain variable  
DHPCA-100 FEMTO  
Gain de  $10^2$ - $10^8$  .Bruit = $55 \text{ fA/ Hz}^{0.5}$

*Figure3.9. amplificateur de tension.*

#### **3.5.2. CARTE SON :**

Une carte son est une carte d'extension d'ordinateur. La principale de fonction de cette carte est de gérer tous les sons émis pour les envoyer vers les haut-parleurs ou reçus par l'ordinateur.

On a utilise la carte son comme un carte d'acquisition pour l'acquisition de données



*Figure 3.10. Une carte son.*

### **3.6. AMPLIFICATEUR A DETECTION SYNCHRONE VIRTUELLE (LOCK IN) :**

#### **3.6.1. LA DETECTION SYNCHRONE (LOCK IN) :**

La détection synchrone est un procédé utilisé lorsque l'on souhaite extraire un signal utile noyé dans un bruit. Ce principe s'applique généralement à des signaux faibles de l'ordre du  $\mu\text{V}$ . Le bruit est un signal indésirable qui vient perturber les circuits.

La détection synchrone (lock-in) permet de gagner en rapport signal/bruit dans un grand nombre d'expériences. Le principe très général est de moduler en amplitude sinusoïdalement le signal excitateur, et de mesurer la réponse du système à la même fréquence. Ainsi, tout autre bruit à une fréquence différente sera filtré et n'affectera pas la réponse. Dans le cas d'EDMR, c'est le champ statique  $H_0$  que l'on module grâce à deux bobines secondaires. Cette modulation est faible et très lente dans le temps par rapport au temps de réponse du système.

Le bruit peut être de deux origines :

- Externe au système : Effet électromagnétique (réseau 50 Hz, effet d'antenne ou de diaphonie). Cet effet peut être minimisé par blindage du circuit
- Interne au système : Bruit dû aux composants eux-mêmes.

#### **3.6.2. ACQUISITION PAR LABVIEW :**

On a créé un programme sous LabView pour générer le signal détecté en sortie de la détection synchrone. Le programme devra permettre de :

## Chapitre III : La description de la technique de résonance paramagnétique de spin EMDR (SDR) Réalisations au CDTA

- tracer le signal de la modulation en fonction du champ  $H_0$ .
- tracer le signal de la résonance

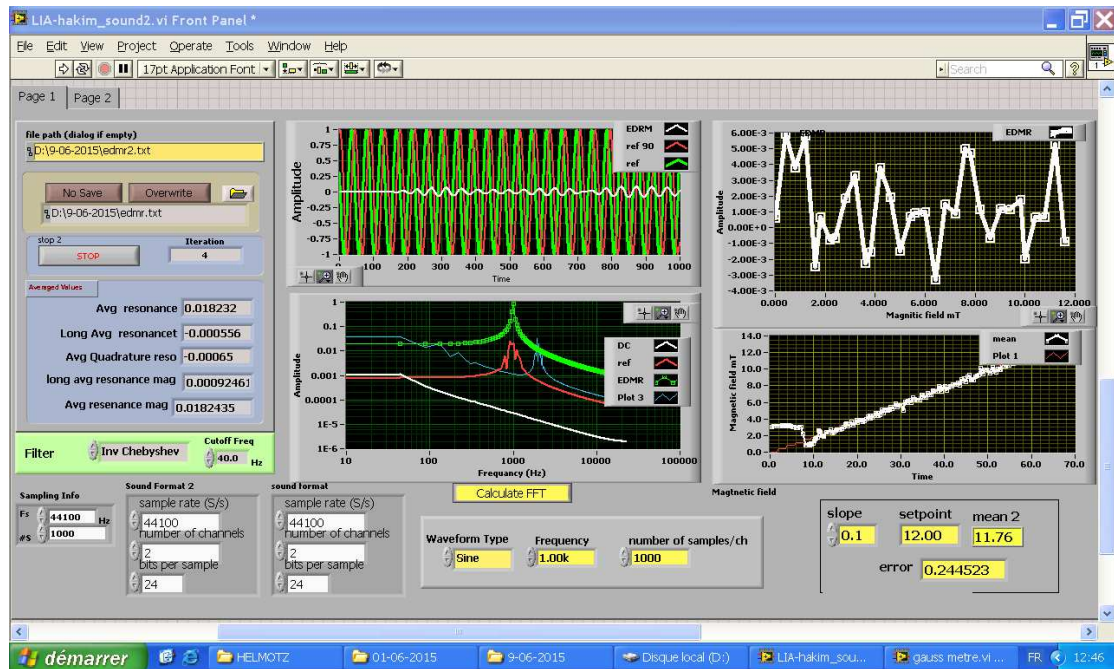


Figure 3.11. Interfaçage LabView.

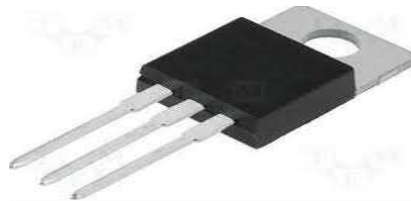
### CONCLUSION :

Pour avoir un signal EMDR parfait il faut éliminer le maximum des bruits.

# Résultats et discussions

#### **4.1. LE TRANSISTOR DE PUISSANCE VDMOSFET:**

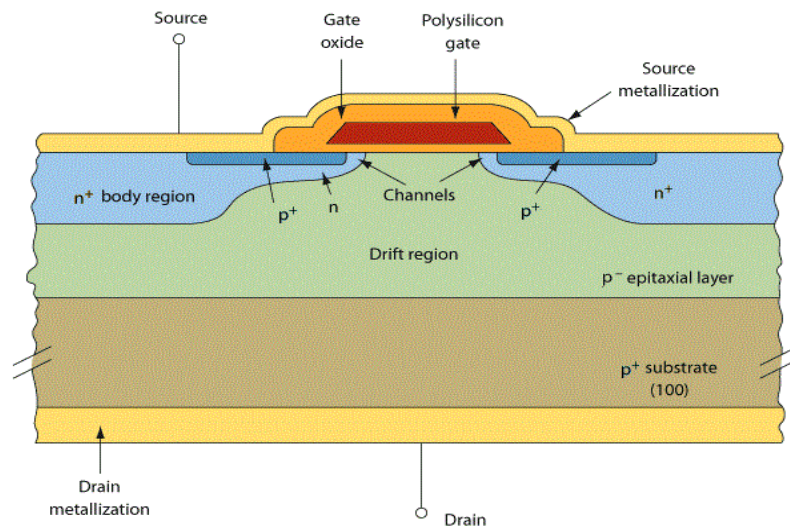
Le transistor utilisé est un transistor de puissance de référence ITF9530N. Le transistor VDMOSFET est constitué d'un substrat semi-conducteur (en le silicium) sur lequel est réalisée une croissance par oxydation d'une couche mince d'oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$ , cette figure représente le transistor de puissance ITF9530N



*Figure4.1. Le transistor de puissance ITF9530N.*

##### **4.1.1. LE PRINCIPE DE TRANSISTOR VDMOSFET :**

La Figure 4.2 schématise la structure interne du transistor VDMOSFET (vertical double diffused Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor,) le drain et la source sont réalisés sur des régions fortement dopées. La grille est électriquement isolé du substrat de type p par une couche isolante de dioxyde du silicium ( $\text{SiO}_2$ ). Lorsqu'on applique une tension négative sur la grille par rapport à la source, un champ électrique est créé et est dirigé vers la grille et traverse directement la région n ce situant sous la grille. Le champ électrique éloigne les charges négatives dans la région n et il y a création ou augmentation d'une région p à sa place. Une conduction, alors peut avoir lieu entre le drain  $p^+$ , la région p et la source  $p^+$ . L'augmentation ou la diminution de la tension de la grille provoque la création alors d'un canal induit p qui peut croître ou diminuer en taille, et ainsi peut se faire le contrôle de la conduction. La tension appliquée entre la grille et la source doit dépasser une valeur du seuil  $V_{th}$  pour pouvoir tourner le MOSFET «ON ». Réduire la tension au-dessous  $V_{th}$  provoquera le MOSFET à tourner « OFF ».<sup>(11)</sup>



Figur4.2. schéma illustratif d'un VDMOSFET.<sup>(11)</sup>

#### 4.1.2. LA STRUCTURE D'UN TRANSISTOR VDMOSFET :

La vue en coupe transversale du dispositif est représentée sur la figure 4.3. En a remarque plusieurs cellules voir la source de transistor ayant un vide qui indique le canal de VDMOSFET

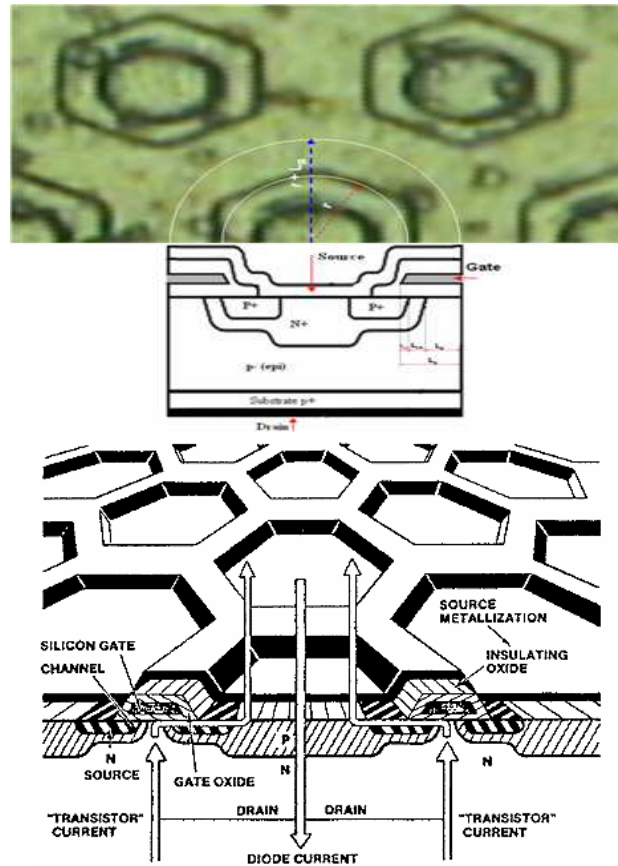


Figure 4.3. Structure du VDMOSFET : Vue de dessus et coupe transversale.<sup>(11)</sup>

## 4.2. PRESENTATION DES RESULTATS :

### 4.2.1. LE TRANSISTOR DE PUISSANCE VD MOSFET :

Le transistor de puissance VD MOSFET est entièrement traité. Dans le cas où la tension de grille  $V_g$  est légèrement supérieure à la tension de bande plate, il y a création d'un champ électrique dirigé vers le substrat. Ce champ électrique tend à pousser les trous vers le substrat créant ainsi, au voisinage de la surface, une zone désertée d'épaisseur  $X$  et de charge négative  $Q$  appelée charge de déplétion due aux accepteurs ionisés. Puisque la surface est appauvrie de porteurs libres, ce régime est dit régime de déplétion

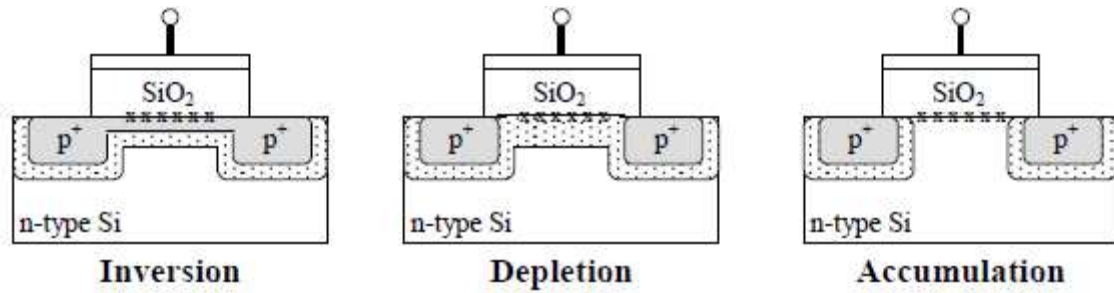


Figure 4.4. Le transistor MOSFET est balayé de l'accumulation à l'inversion, on observe habituellement une crête présentée à l'interface quand les nombres des trous et des électrons sont égaux.

Dans la Figure 4.6 elle représente les différents signaux de  $I_D$ (A) en fonction de  $V_G$ (V) en augmentant à chaque fois le courant  $V_D$  de (50 mV à 900mV), on a constaté ce qui suit : plus on augmente la tension plus le courant  $I_D$  augmente .

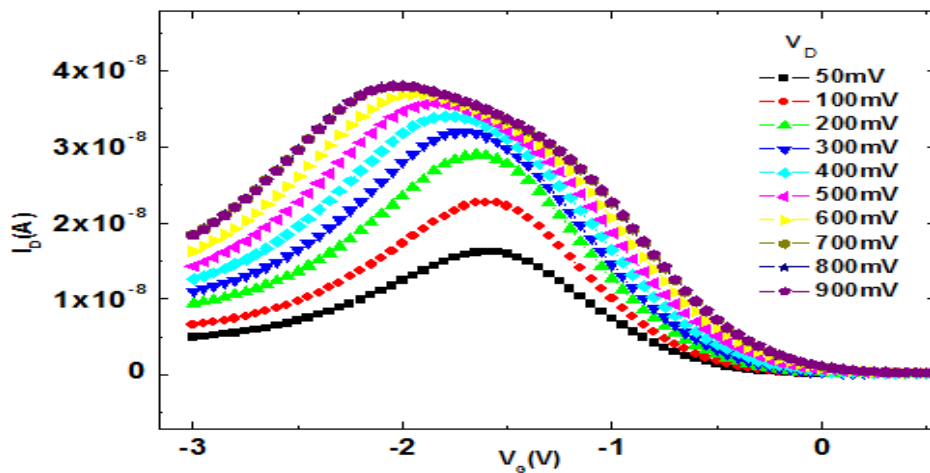


Figure 4.5. Représente augmentation de courant  $I_D$  en fonction de la tension  $V_D$ .

Cette figure représente la courbe de transistor à l'état de déplétion qui est environ de ( $1.7 \times 10^{-7} I_D$ (A) et  $-0.4V_G$ (V)) à une tension de  $V_D=300$ mV afin d'avoir le nombre des trous et des électrons égal à l'interface.

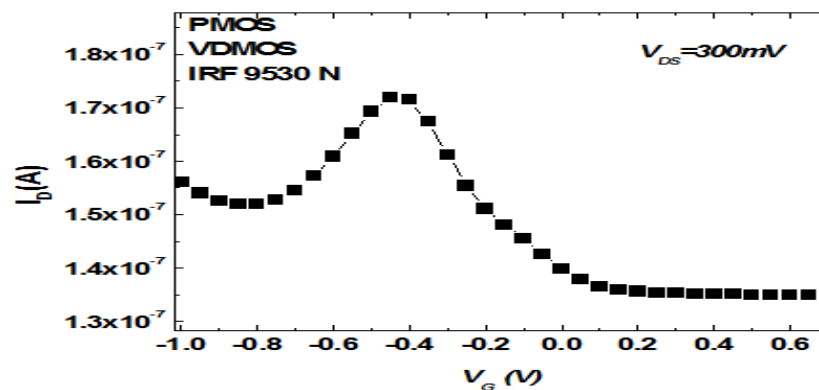


Figure 4.6. représente une courbe d'un transistor du régime déplétion

#### 4.2.2. L'INTERFACE LABVIEW :

Pour commencer l'analyse, nous avons créé un dossier dans la partie « D » du disque dur, puis ouvert le logiciel « LabView » puis l'enregistré dans le dossier qu'on a créé sous forme de (D:\9-06-2015\edmr1.txt) dont chaque essai il suffit de changer le numéro dans lequel l'enregistrement se fait automatiquement.

Avant de commencer les mesures il faut d'abord régler le champ magnétique dans le gaussmètre à (0 mT). Le signal de sortie est réglé de 0 à 12 mT .

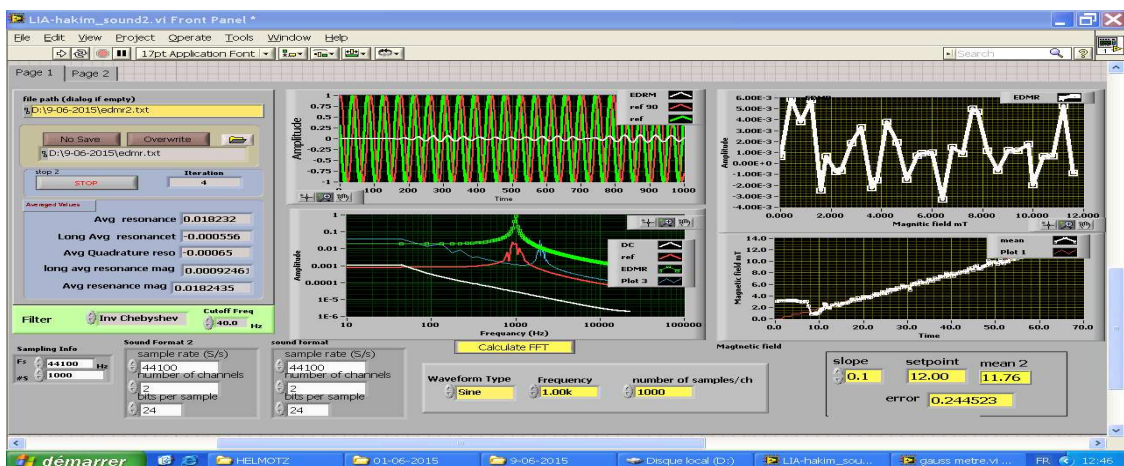


Figure 4.8. Représente la face de programme LabView

Dans la figure 4.7 : a) elle reflète les différents signaux à la sortie de la détection synchrone Virtuelle (lock in), le signal blanc indique notre signal EDMR et pour les deux

signaux le rouge et le vert sont des signaux de référence sous forme sinusoïdale décalé de  $\frac{\pi}{2}$ . b) cette dernière est la transformée de Fourier de signaux précédant à une fréquence de 1KHz.

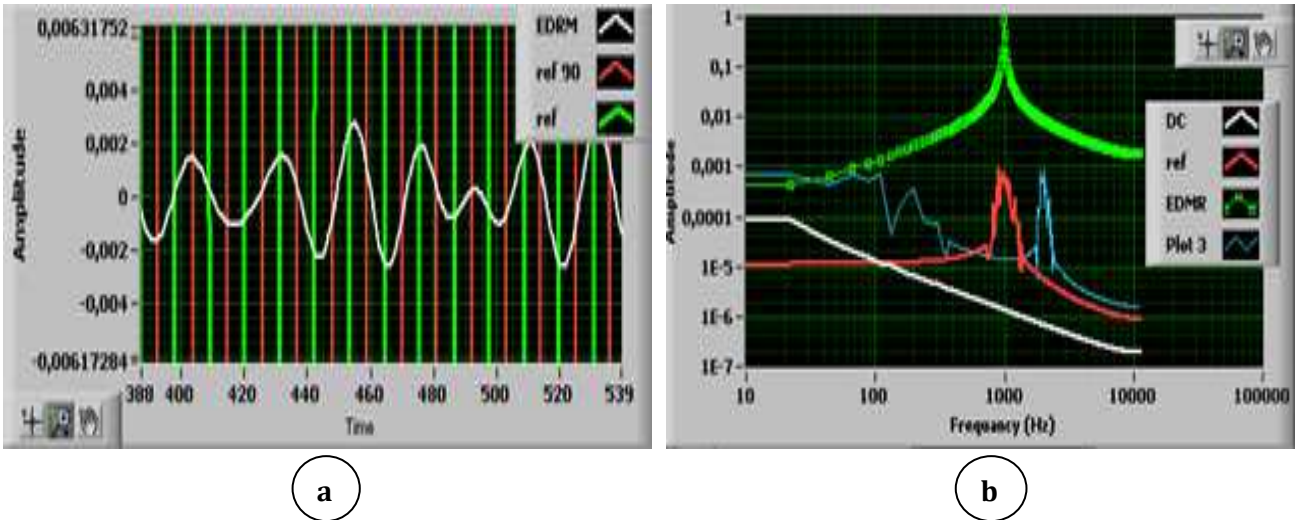


Figure 4.9. a) représente les différents signaux à l'entrée et b) la transformée de Fourier du signal précédant.

Dans la figure 4. a) le signal le blanc représente le signal EDMR qui suit un consigne en couleur rouge, ce signal est sous forme de champ magnétique en fonction de temps en allant de 0 jusqu'à 12mT, b) elle nous donne notre signal final qui est le courant en fonction du Champ magnétique, notre signal de résonance est tellement bruité, c'est la raison pour laquelle on doit faire plusieurs essais.

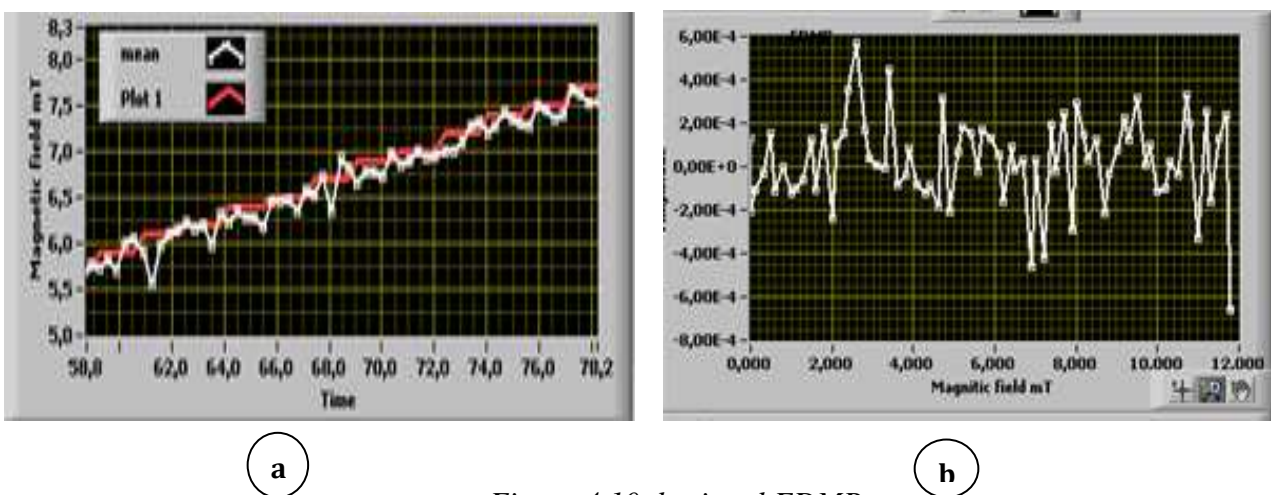


Figure 4.10 .le signal EDMR.

### 4.3. INTERPRETATION DES RESULTATS :

Cette figure 4.9 indique les différents signaux EDMR obtenus lors de la simulation caractérisées par un nombre de 23 signaux dont la moyenne est obtenue à partir de la somme de ces derniers en tout point en les divisant par le nombre de caractérisations (23) afin d'avoir un signal pur et d'atténuer les bruits.

Les bruits ont une tendance à ne pas avoir une fréquence stable en faisant la somme des 23 signaux cela veut dire que les bruits qui n'ont pas la même fréquence vont être éliminés. Les signaux sont obtenus en fonction du courant  $I_D$  (A) et en fonction du champ magnétique B (mT), on remarque dans cette figure que les 23 signaux qui sont représentés par de différentes couleurs, le signal qui est en rouge indique les point de ressemblance des 23 signaux qui est le signal de sortie.

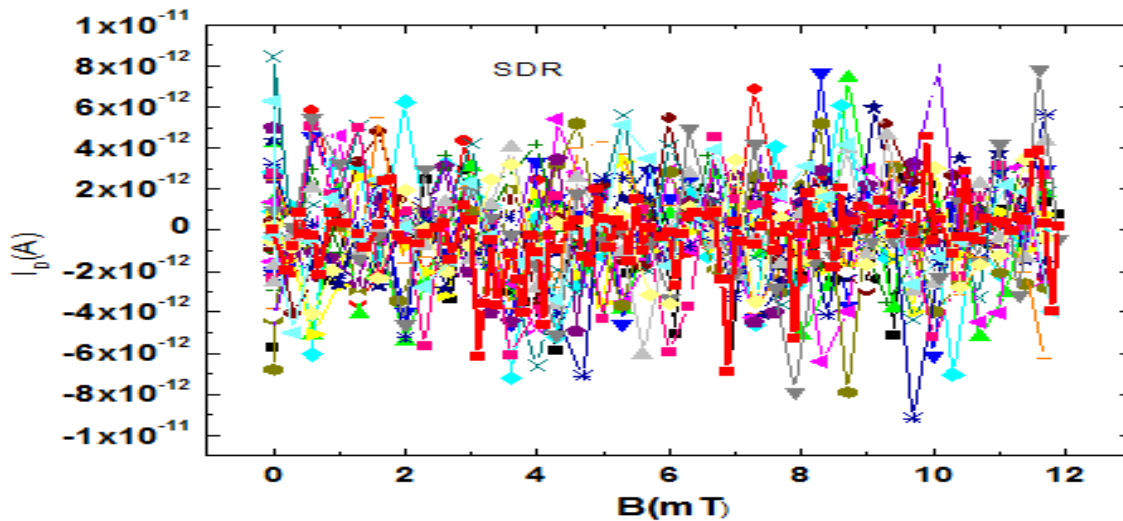


Figure 4.11. La représentation de la somme des 23 signaux EDMR.

Cette figure 4.8 indique le résultat final de l'opération précédente. Notre signal est représenté en fonction du courant  $I_D$  qui est allé de  $(-3.0 \times 10^{12}$  à  $3.0 \times 10^{12}$  A) et le champ magnétique B (de 0 à 12 mT). Nous avons remarqué que dans l'intervalle de [6 à 8 mT] résulte un défaut, et pour les différentes zones sont des interactions hyper fines.

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

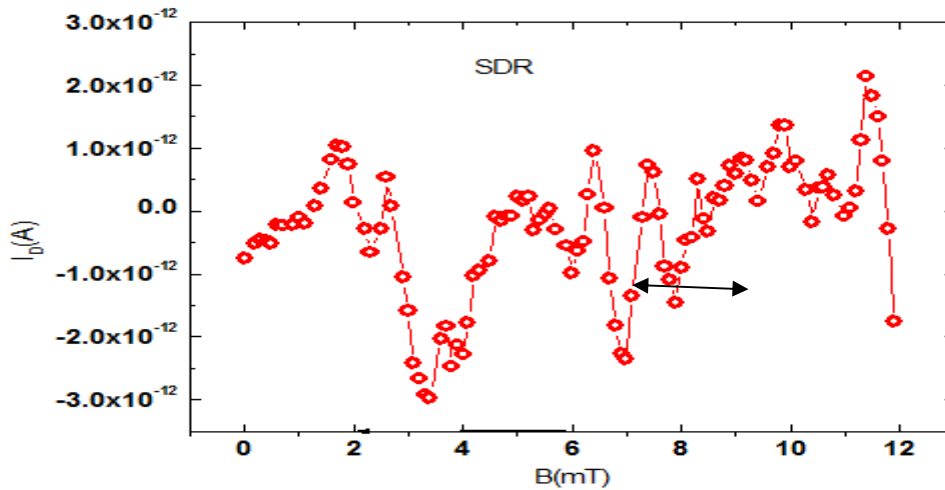


Figure4.12. le signal EDMR.

#### 4.4. PROBLEMES PRODUITS :

On a rencontré des problèmes durant le test voir ce qui suit :

1. Beaucoup de câbles reliant matériels est inutilement long, ce dernier provoque des sources de bruit.
2. D'interprétations des données.
3. Le générateur radiofréquence disponible (Agilent 8648D) ne permet pas de générer une puissance supérieur à 14 dBm (25 mW).
4. Le signal de la résonance paramagnétique de spin (RPS) est noyé dans le bruit.
5. Le manque de la matière première pour la cavité.
6. Le réglage de champ magnétique est très difficile à cause des bruits extérieurs

#### 4.5. TRAVAUX FUTURS ET PERSPECTIFS:

Pour un signal plus performant il faudra :

1. Diminuer la longueur des fils pour éviter les bruits.
2. Réalisation d'un amplificateur radiofréquence (Département technique) ou CDTA.
3. Implémentation d'un amplificateur à détection synchrone pour extraire le signal.
4. Consultation des experts.
5. Mettre l'appareil dans une armoire pour éviter les bruits extérieurs.

# Conclusion générale

## **CONCLUSION GENERALE:**

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

L'identification des microstructures des défauts dans Si-SiO<sub>2</sub> est très importante pour comprendre les mécanismes responsables de la dégradation des transistors, une fois ces mécanismes sont connues, elle nous permet d'agir sur le procédé de fabrication pour diminués ces défauts

Notre travail consiste a identifié les défauts dans le Si-SiO<sub>2</sub>, d'un transistor de puissance par la résonance paramagnétique, après plusieurs simulation nous somme arrivé à obtenir des signaux EDMR qui a détecté des défauts dans l'intervalle du champ magnétique de (6 a 8 mT). Les signaux que nous obtenus sont reproductibles malgré qu'à plusieurs reprise nous avons dû rebrancher tout les blocs du système et refaire les réglages des paramètres.

Le matériel de caractérisation est fabriqué au CDTA et nous avons pu franchir beaucoup de problèmes d'étalonnage pour pouvoir obtenir ce signal et détecter des défauts, il nous a était difficile aussi de régler le champ magnétique à 0mT avant de commencer même à mesurer et ceci à cause des perturbations dues à la compatibilité électromagnétique du système. En effet le fils utilisés ont été une source de perturbations qui nous ont rendu la tache difficile puisqu'ils fonctionnent comme des antennes qui captent des signaux externes et les transforment en bruits internes. La qualité du matériel est aussi très importante pour avoir une bonne résonance.

La détection des défauts avec cette méthode a été réalisé avec succès et nous pouvons ; il reste cependant à compléter cette technique par l'identification des défauts qui ne sera possible que lorsqu'un logiciel de traitement des données muni d'une base de données importante soit conçu pour l'identification et l'attribution de chaque type de signal au défaut correspondant. C'est ainsi que nous envisageons continuer dans ce domaine pour pouvoir réaliser cette base de données et ainsi compléter la technique.



# Références bibliographique

# Références bibliographiques

- 1) BRAD C. BITTEL, study of defect structure and electrical transport in back end of line dielectrics and sic mosfets), doctor en philosophies à l'université the pennsylvania state, 2012.
- 2) CHEUK CHILO (electrical detection of spin-dependent transport in silicon) doctor en philosophies à l'université california at berkeley, 2011
- 3) COREY J. COCHRANE, (development of new atomic scale defect identification schemes in micro/ nanoelectronics incorporating digital signal processing methodes for investigating zero/low field spin dependent transport and passage effects in electrically detected magnetic resonance), 2013
- 4) COREY J. COCHRANE, (utilizing adaptive filtering techniques to enhance the sensitivity of electrically detected magnetic resonance measurements in variously processed 4h silicon carbide mosfets), ingenieur en électronique à l'université pennsylvania state, 2007
- 5) JASON P. CAMPBELL ( atomic-scale defects involved in the negative bias temperature instability in  $\text{SiO}_2$  and plasma-nitrided oxide based pmosfets) doctor en philosophies à l'université de pennsylvania , 2007.
- 6) JASON THOMAS RYAN (magnetic resonance observations of defects involved in bias temperature instabilities and stress induced leakage currents in hfo2 and sio2 based metal-oxide-silicon structures) doctor en philosophies à l'université de pennsylvania , 2010
- 7) JOSEPH P. ACQUAVIVA (low field electrically detected magnetic resonance) ingénieur de l'université de pennsylvania, 2011
- 8) MOHAMED BOUBAAYA (extarction des parametres et investegation de la dégradation NBTI sur transistor de puissance vdmos sous champs magnetique) rapport d'activités .division microelectronique et nanotechnologies .CDTA

- 9) SELLAMI MOHAMMED ( simulation de la technique de pompage de charge à trois niveaux pour la modélisation des défauts à l'interface tmos submicronique ) présente pour obtenir le diplom doctoraten sciences . l'université mentouri de constanténe
  
- 10) VES MANEGLIA (analyse en profondeur des défauts de l'interface SI-SIO<sub>2</sub> par la technique du pompage de charges) docteur de l'institut national polytechnique de grenoble 1992

# Résumé

L'identification des microstructures des défauts dans la structure Si-SiO<sub>2</sub> est très importante, car elle nous permet de comprendre les mécanismes responsables de la dégradation des composants électroniques ; une fois ces mécanismes sont connus, cela nous permet d'agir sur le procédé de fabrication pour diminuer ces défauts. Des recherches dans le domaine de la caractérisation se sont donc orientées vers la résonance de spin

Ce mémoire a pour but d'apporter une contribution dans le domaine de la résonance paramagnétique pour l'identification des défauts atomique de Si-SiO<sub>2</sub>, pour une meilleure connaissance de l'origine physique des défauts et ainsi l'amélioration de la qualité des dispositifs et leur performance.

Notre travail consiste à identifier les défauts dans le Si-SiO<sub>2</sub>, d'un transistor de puissance par la résonance paramagnétique, après plusieurs simulation nous sommes arrivés à obtenir des signaux EDMR qui ont détecté des défauts dans l'intervalle du champ magnétique de (6 à 8 mT). Les signaux que nous obtenus sont reproductibles malgré qu'à plusieurs reprises nous avons dû rebrancher tout les blocs du système et refaire les réglages des paramètres. Le matériel de caractérisation est fabriqué au CDTA. La détection des défauts avec cette méthode a été réalisée avec succès et nous pouvons ; il reste cependant à compléter cette technique par l'identification des défauts qui ne sera possible que lorsqu'un logiciel de traitement des données muni d'une base de données importante soit conçu pour l'identification et l'attribution de chaque type de signal au défaut correspondant. C'est ainsi que nous envisageons continuer dans ce domaine pour pouvoir réaliser cette base de données et ainsi compléter la technique.

**Le mot clé : l'identification de la microstructure des pièges dans Si/SiO<sub>2</sub>**