

Thèse

Présentée à

L'UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCEN



Pour obtenir le grade de

Docteur en Science Physique

Option : Physique Electronique

Par

Mme Baba Ahmed (née Ourrad) Mériem

**Etude de l'Effet de la Température de Transition de Phase sur le Mode de Fonctionnement des FeRAM.
Application du Modèle de Landau**

Devant le jury

Président

Chaabane Sari Nasr Eddine

Professeur

Université A.B.B. Tlemcen

Directeur de thèse

Benouaz Tayeb

Professeur

Université A.B.B. Tlemcen

Examineurs

Belghachi Abderrahmane

Professeur

Université de Béchar

Helmaoui Abderrachid

Professeur

Université de Béchar

Merad Abdelkrim

Professeur

Université A.B.B. Tlemcen

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de ma chère Maman

A mon cher Papa qui a fait preuve de beaucoup de patience et de sacrifice, qu'il trouve ici un modeste témoignage de mon indéfini tendresse...il y a tant d'amour et de générosité dans ton âme.

A ma belle mère.

A mon cher mari pour son soutien, son encouragement et sa patience tout au long de mes travaux.

A ma chère sœur et mes chers frères.

A toute la famille et toutes mes copines

A tous ce qui me sont chers.

A tous les membres du laboratoire de Physique Electronique et Modélisation de l'université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Meryem

Remerciements

Les travaux qui font l'objet de cette thèse ont été réalisés au sein de l'équipe App. Et Stab. des Syst. N. L. du Laboratoire d'Automatique de l'Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, sous la direction du Monsieur le Professeur Tayeb BENOUAZ.

Je tiens à lui exprimer particulièrement ma gratitude, c'est bien lui qui a dirigé cette thèse avec une disponibilité de tous les instants ; il a guidé mes travaux avec beaucoup de patience tout le long de la préparation de cette thèse.

Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuses gratitude pour la clarté de son enseignement, les conseils judicieux et le soutien constant qui ma prodigués au cours de l'élaboration de ce travail.

Je remercie vivement, Monsieur le professeur N. CHAÂBANE SARI, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Je remercie vivement, Monsieur A.BELGHACHI, Professeur à l'université de Bechar, Monsieur A.HELMAOUI, Professeur à l'université de Bechar, Monsieur A.MERAD, Professeur à l'universitaire de Tlemcen, pour l'honneur qu'ils me font d'examiner ces travaux.

A tous les membres du laboratoire de Physique Electronique et Modélisation.

A tous ceux qui m'ont aidé, par une grande collaboration ou par une tendre parole.

Mille Merci,

Meryem

Table des Matières

Introduction Générale	7
0.1 Note historique	7
0.2 Position du Problème	11
0.3 Contribution	11
1 Effet de la température sur les ferroélectriques	15
1.1 Introduction	15
1.1.1 Historique de la ferroélectricité	16
1.1.2 Caractéristiques physiques des diélectriques (Ferroélectriques). . .	17
1.1.3 Théorie de transition de phase de Landau.	20
1.2 Comportement dynamique des FeCAP(Ferroelectric capacitor) en fonction de la température	22
1.2.1 Présentation des FeCAP	22
1.3 Capacité des FeCAP en fonction de la température	24
2 Technologie FeRAM: la nouvelle mémoire universelle	30
2.1 Introduction	30
2.2 La mémoire NOVRAM	31
2.2.1 La mémoire MRAM	32
2.2.2 La mémoire PCRAM	33
2.3 La mémoire ROM	34

2.3.1	La mémoire EPROM	35
2.3.2	La mémoire Flash EEPROM	35
2.4	Principe de fonctionnement des FeRAM	37
2.4.1	Structure de la FeRAM	37
2.4.2	Stockage de l'information	38
2.4.3	Principe d'écriture et de lecture de la FeRAM	39
2.5	Intérêt de l'utilisation du matériau ferroélectrique	40
2.5.1	Quels sont les principaux avantages d'une mémoire FeRAM par rapport à une mémoire Flash ou EEPROM ?	41
2.5.2	Limitations de la technologie FeRAM	43
3	Influence de la température sur le mode de fonctionnement des FeRAM	46
3.1	Introduction	46
3.2	Modélisation de la FeRAM	47
3.2.1	Modélisation du condensateur ferroélectrique	48
3.2.2	Modélisation du transistor FeFET	53
3.3	Conclusion	58
4	Effet de la température du BST sur les FeRAM	60
4.1	Introduction	60
4.2	Contribution à l'effet de la température de transition du BST sur le fonctionnement d'une FeRAM	63
4.3	Hypothèse de base du BST	64
4.4	Capacité du FeCAP construit par le BST	66
4.5	Réponse du FeFET fabriqué par le BST	67
4.6	Réponse de la FeRAM au champ électrique appliqué	69
4.7	Mécanismes de Défaillance de la FeRAM	70
4.7.1	Fatigue	70
4.7.2	Formation d'une couche passive	71

4.7.3 Imprint	71
4.8 Conclusion Générale	74
Bibliographie	76

**Nomenclature des symboles
et paramètres utilisés dans la thèse**

$G(P, T, E)$ the free energy of the dielectric
 E the electric field
 P the polarization of the dielectric
 T the temperature
 D the dielectric induction
 U the voltage
 T_c the temperature of Curie
 A_0 and B are two constants which depend on the dielectric medium
 ε the dielectric constant
 ε_0 the permittivity of the vacuum
 ε_r the relative permittivity of the dielectric
 e the thickness of the capacitor
 S the surface of the electrodes of the capacitor
 R the resistance (Ohms)
 U_0 the amplitude of the voltage
 U_{DS} the tension between the drain and the source of the transistor
 U_{GS} the tension between the grille and the source of the transistor
 I_{DS} the intensity between drain terminal and source
 V_{th} the tension of threshold
 T_{ox} Thickness of the gate oxide
 q the electric charge (Cb)
 t the time(s)
 μ^* the mobility of the charge in the Channel
 C the capacitance (Farad)
 L width of the MOS transistor
 Z the width of the grid
 C : Curie-Weiss constant
 $\alpha_0, \beta_3, \alpha_{11}, \beta_{33}$, Landau's coefficient

Introduction Générale

Introduction générale

0.1 Note historique

Les technologies microélectroniques ont atteint un niveau de performance important, notamment en terme de densité d'intégration, mais la miniaturisation des composants électroniques a atteint un tel niveau de complexité, de nos jours, qu'il devient de plus en plus difficile de repousser les limites de leurs performances, qui semblent buter désormais sur des obstacles fondamentaux imposés par les lois de la physique.

Notre vie quotidienne est envahie d'objets divers produits par l'industrie des semi-conducteurs: appareils photos numériques, mémoires amovibles (clés USB, SmartMedia), disques durs de très grande capacité, frôlant le millier de giga-octets, disques compacts optiques réinscriptibles, ...etc.

Tous ces objets qui facilitent et agrémentent notre vie quotidienne n'auraient pas vu le jour sans la recherche fondamentale entreprise en physique d'une manière générale, mais plus particulièrement en physique des solides et des semiconducteurs, après la fin de la deuxième guerre mondiale. Cette recherche fondamentale était nourrie en grande partie par la compétition militaire féroce que se livraient les Etats-Unis et l'ex-Union soviétique pendant la guerre froide. L'un des objectifs majeurs, à cette époque, était la mise au point de calculateurs performants pour calculer la trajectoire des missiles intercontinentaux, composants stratégiques de l'équilibre de la terreur, mais aussi des vaisseaux spatiaux, telles les capsules Apollo qui ont amené les premiers hommes sur la lune. De tels calculateurs nécessitaient des composants fiables, susceptibles de fonctionner pendant de longues périodes sans intervention humaine.

On peut raisonnablement affirmer que trois dates marquent un tournant important dans l'histoire, récente, de l'industrie des composantes électroniques[1]:

-En 1947 : invention du transistor par W. Schockley, J. Bardeen et W. Brattain.

Pendant la première moitié du XXème siècle, l'industrie électronique était dominée par les tubes à vide. Ces composants étaient peu pratiques : ils étaient fragiles, encombrants, peu fiables, consommaient et chauffaient beaucoup. Par ailleurs, les réseaux téléphoniques étaient constitués de relais mécaniques qui tombaient souvent en panne. Ces problèmes ont été résolus par l'invention du transistor en 1947 dans les laboratoires Bell, invention qui valut à ses trois co-auteurs le prix Nobel de physique en 1956: les transistors étaient minuscules par rapport aux tubes à vide, étaient plus fiables, avaient une longévité plus grande, consommaient et chauffaient beaucoup moins. L'invention du transistor stimula les ingénieurs pour inventer des circuits toujours plus complexes contenant des milliers de composants tels que les transistors, les diodes, les résistances et les condensateurs.

Malgré ce grand progrès, un obstacle de taille demeurait : ces composants devaient être reliés, individuellement, par des kilomètres de fils électriques qui rendaient l'entreprise coûteuse. Le défi consistait à trouver un procédé efficace et peu onéreux pour produire ces composants et les relier entre eux. Ce défi fut relevé, indépendamment, par Jack Kilby, ingénieur chez Texas Instruments, et Robert Noyce, co-fondateur de Fairchild Semi-conducteur et de Intel.

-En 1958 : invention du circuit intégré par J. Kilby et R. Noyce

J. Kilby eut l'idée de fabriquer sur un même substrat de silicium tous les composants d'un circuit électronique donné (diodes, résistances, transistors, condensateurs) alors qu'il travaillait sur le projet «Micro-Module », chez Texas Instruments. Le projet « Micro-Module » était censé résoudre les problèmes posés par l'interconnexion des composants, mais Kilby pensait qu'il était voué à l'échec. Parallèlement, et indépendamment, R. Noyce mettait au point le procédé « planar ». Ce procédé est basé sur une oxydation en surface afin de séparer, par une couche isolante, plusieurs niveaux d'interconnexion sur un même substrat de silicium. Le procédé « planar » a connu un grand succès industriel qui a failli coûter à J. Kilby la paternité du circuit intégré. Par la suite, le Bureau américain des brevets reconnut à Kilby la paternité de l'invention du circuit intégré monolithique

tandis que l'invention du procédé « planar » a été attribuée à Noyce. Le circuit intégré, plus communément appelé puce, a été unanimement reconnu comme l'une des inventions majeures de l'humanité en raison de l'impact considérable qu'il a eu dans notre vie quotidienne. Il valut le prix de Nobel de physique à Jack Saint-Clair Kilby en 2000.

-1968 : mise au point du premier microprocesseur par T. Hoff

L'invention du circuit intégré a rendu possible, entre autres, la mise au point des supercalculateurs. Pendant les années cinquante et soixante, seuls les grands organismes gouvernementaux et les grandes firmes avaient les fonds nécessaires pour s'offrir des machines avec de telles puissances de calcul. Cette situation allait changer en 1968, quand Ted Hoff, un ingénieur de la firme Intel, invente, sous la houlette de Robert Noyce et de Gordon Moore, les co-fondateurs d'Intel, le premier microprocesseur : le 4004. Il fut commercialisé par Intel en 1971. Cette invention a ouvert la voie à la production en masse des ordinateurs personnels.

L'invention du circuit intégré et du microprocesseur a rendu possible le traitement d'une quantité sans cesse croissante de données. Ces données doivent être stockées quelque part avant, pendant, et après leur traitement, la solution est l'utilisation de nouvelles mémoires.

Historiquement, la première mémoire moderne a été la carte perforée, inventée par l'Américain Hermann Hollerith en 1880 pour la saisie de données statistiques. Le succès de son invention stimula Hollerith qui, en 1896, fonda la compagnie IBM. A titre d'exemple, l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), ordinateur utilisé par l'armée américaine dans le cadre du projet "Manhattan" utilisait des cartes perforées en tant qu'interface d'entrée/sortie.

Selon les applications visées, divers types de mémoires sont apparus sur le marché. On peut cependant citer quelques unes: SRAM, DRAM, FLASH-EEPROM, FeRAM...[2].

La mémoire non volatile a semiconducteur apparaît en 1967 [Kahng et Sze, 1967]. Elle utilise le principe de stockage des charges sur une grille flottante insérée dans la couche d'oxyde du transistor. Sa miniaturisation a suivi la loi de Moore jusqu'au début

des années 1990 ou les chercheurs mettent en évidence qu’une réduction de l’oxyde tunnel en deçà de 7-8 nm ferait perdre son intégrité à la mémoire. Dès lors, une course contre la montre est lancée pour résoudre les problèmes des pertes de charges sans ralentir la miniaturisation. D’une part, les mémoires à couches de nitrure apparaissent en 1989 et les mémoires à nanocristaux en 1995 (solution “More Moore”). D’autre part, de nouvelles mémoires non volatiles dont le mode de stockage diffère de celui de la mémoire à grille flottante (solution “More than Moore”) voient le jour. Au-delà de 2018, les chercheurs espèrent maîtriser le stockage, la détection et la rétention d’un électron unique dans une mémoire à point quantique (dispositif ultime de la mémoire électronique). Cependant, les mémoires alternatives seront peut-être plus performantes et plus à même de remplacer les mémoires non volatiles actuelles.

Les mémoires ferroélectriques ont attiré beaucoup d’attention en raison de leur faible consommation d’énergie, et leur rapide vitesse de commutation par rapport à la mémoire Flash [3][4]. Récemment, les transistors ferroélectriques à effet de champ (FeFET), avec la structure Metal-Ferroélectrique-isolant-Silicium (IMF) sont apparus comme prometteurs [5]. Les caractéristiques supérieures des FeFET comprennent, une structure de dispositif unique, une taille petite, faible consommation d’énergie, et opération de lecture non destructive [6]. Le but de la couche d’isolant dans la structure IMF est d’empêcher la réaction inter-diffusion entre la couche ferroélectrique et le substrat de silicium qui dégrade fortement les caractéristiques des dispositifs [7][8]. Après insertion d’une couche tampon du matériau ferroélectrique, on a une faible fuite et une bonne interface. Récemment le BiFeO_3 a attiré une grande attention pour ces multiples propriétés ferroélectriques et magnétiques [9][10]. En outre, le BiFeO_3 possède une faible température de cristallisation et une grande polarisation rémanente P_r , par rapport aux autres matériaux ferroélectriques, donc il peut être adapté dans la fabrication des FeRAM. Les caractéristiques des structures IMF avec des films minces ferroélectriques de BFO et ZrO_2 , $\text{Ba}(\text{Sn};\text{Ti})\text{O}_3$, Y_2O_3 et HfO_2 ont été rapportées dans ces années [11][12][13]



Figure1: Echelle des temps décrivant l'évolution des mémoires nonvolatiles depuis 1965.

0.2 Position du Problème

Notre problème consiste en l'étude de la transition de phase dû au changement de la température au niveau de la FeRAM. Le matériau choisi dans la fabrication de la FeRAM est ferroélectrique. Le modèle théorique choisi est celui de Landau. Le but est de voir l'influence de la température sur le mode de fonctionnement de celle-ci. En d'autres termes l'influence sur le comportement dynamique du condensateur ferroélectrique (FeCAP) et du transistor ferroélectrique (FeFET).

0.3 Contribution

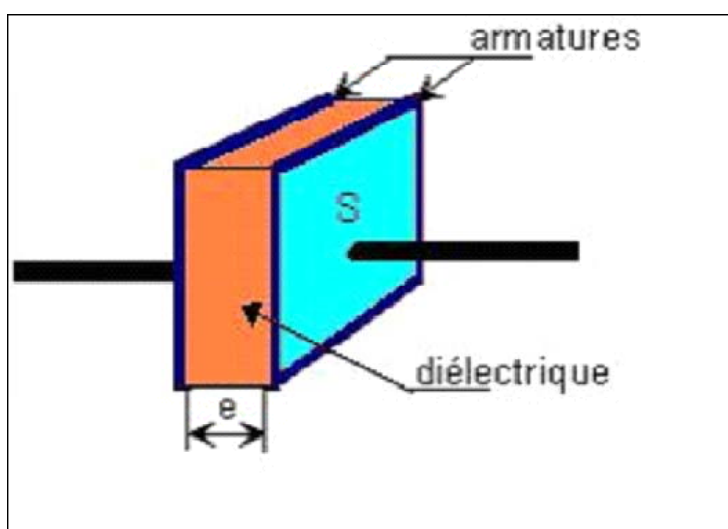
Le travail présenté dans cette thèse se veut une continuité du mémoire de Magister intitulé "Étude de la transition de phase dans le diélectrique d'un condensateur". Il se veut une contribution à l'étude de l'effet de la température de transition de phase sur le mode de fonctionnement des FeRAM.

l'étude est basée sur l'utilisation du Modèle de Landau non linéaire, qui explique la transition de phase qui se passe dans un matériau ferroélectrique.

L'outil numérique, nous permet de résoudre les équations non linéaires décrivant ce Modèle, et par la suite de voir l'effet de la température sur le comportement dynamique de la mémoire FeRAM.

Dans le premier chapitre, nous avons utilisé les équations de la thermodynamique des diélectriques et le modèle de Landau pour l'étude de la transition de phase dans un condensateur ferroélectrique.

Le banc d'essai utilisé est le suivant



Banc d'essai du condensateur ferroélectrique

Un modèle mathématique a été proposé pour la description du changement de phase. La solution des équations du Modèle en fonction de la température, montre qu'il y'a un changement qualitatif au niveau du condensateur ferroélectrique par rapport à un condensateur à vide. Les résultats ont fait l'objet d'une publication intitulée "Phase transition in Medium dielectric" publiée dans "International Review of Physics".

Le second chapitre est consacré à une présentation succincte de la technologie FeRAM, ainsi que les étapes de sa fabrication en utilisant le matériau ferroélectrique.

Dans le troisième chapitre, une étude théorique de l'influence de la température sur

le mode de fonctionnement des FeRAM, à savoir le comportement dynamique du FeFET(Transistor Ferroélectrique à effet de champ) et du FeCAP(Condensateur Ferroélectrique) est présentée. Pour cette étude, le sel de Rochelle est choisi comme matériau ferroélectrique.

Le quatrième chapitre est dévolu à une étude de l'effet de la température sur le mode de fonctionnement des FeRAM, le matériau ferroélectrique choisi est le BST, des résultats intéressants seront présentés.

Une conclusion et des perspectives terminent cette thèse.

Enfin, les travaux présentés ici ont été exposés dans plusieurs articles: un article "Phase Transition in Medium Dielectric" a été publié dans "International review of physics", une deuxième "The Temperature effect on the Operating Mode of FeRAM", dans "Internationnal Journal of a Nonlinear Sciences".

Des résultats préliminaires ont fait l'objet de communications dans des Conférences Internationales. Ainsi, un article est a paraître dans "the proceeding of the Eight International Conference on Material Sciences". Enfin, un autre travail à été soumis à une revue international en septembre 2012

PREMIER CHAPITRE

Effet de la Température sur les ferroélectriques

Chapitre 1

Effet de la température sur les ferroélectriques

1.1 Introduction

Pour étudier l'effet de la température sur les matériaux ferroélectriques, on utilise comme support les FeCAP (condensateur ferroélectrique), en d'autres termes on s'intéresse à la réponse de celui-ci au courant électrique et à la température, Cependant, nous utilisons quelques équations de la thermodynamique des diélectriques nécessaires ainsi que le modèle théorique de Landau. Bien que cette théorie est phénoménologique et soit basée sur des hypothèses très simples, elle permet d'appréhender l'essentiel des idées physiques relatives aux transitions de phase continues qui se passe au niveau des matériaux ferroélectriques.

Les ferroélectriques sont les matériaux diélectriques utilisés dans notre étude pour leurs propriétés électriques intéressantes et pour ce faire, nous proposons un modèle mathématique décrivant l'effet de la température sur les FeCAP.

1.1.1 Historique de la ferroélectricité

La ferroélectricité a été découverte au début du siècle (1921) par J. Valasek, dans le sel de Rochelle (potassium sodium tartrate), qui était à l'origine fabriqué en France, en 1665 par le pharmacien Pierre Seignette. Au départ, le sel de Rochelle était utilisé en médecine, comme purgatif léger. La croissance des cristaux de Rochelle était facile et on utilisait donc ces cristaux dans des appareils piézoélectriques tels que les microphones à cristaux et les têtes de lecture des phonographes.

Le sel de Seignette, ou sel de Rochelle, est le nom commun du tartrate double de sodium et de potassium de formule chimique $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6, 4\text{H}_2\text{O}$. Celui-ci est un additif alimentaire (numéro E337) utilisé comme régulateur de pH. Le sel de Seignette a aussi été utilisé pour ses propriétés piézoélectriques, antérieurement à la synthèse des céramiques piézoélectriques au cours des années 1940 (figure1.1).

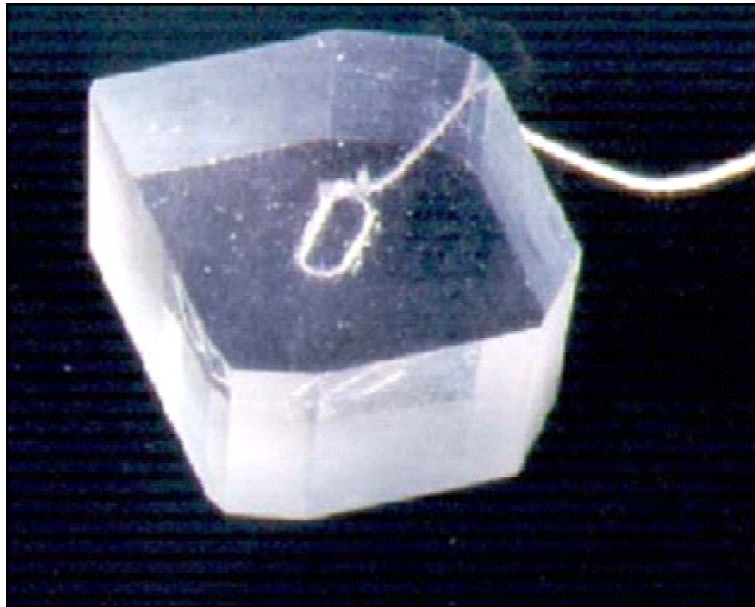


Figure1.1: Sel de Rochelle

Mais ce n'est qu'à partir des années 40 et avec la découverte du caractère ferroélectrique dans le BaTiO_3 que quelques recherches sur ce matériau ont réellement commencé. Ensuite, plusieurs autres matériaux ont été découverts avec cette caractéristique et ont

été regroupés dans la classe des ferroélectriques, mais le BaTiO₃ reste la référence des ferroélectriques[14].

Les principales applications qui en découlent à partir des matériaux ferroélectriques, sont:

-La réalisation des condensateurs à haute permittivité diélectrique.

-La réalisation de capteurs piézoélectriques et de générateurs à ultrasons utilisant des échantillons poly cristallins polarisés.

-La réalisation d'amplificateurs et de modulateurs diélectriques.

-La réalisation de convertisseurs d'énergie thermoélectriques.

-La réalisation de mémoire DRAM(Dynamic Random Access Memories) et NVFeRAM (Non Volatil Ferroélectrique Random Acces Memories).

1.1.2 Caractéristiques physiques des diélectriques (Ferroélectriques).

Un matériau est ferroélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. Malgré l'impossibilité des matériaux ferroélectriques à conduire de l'électricité, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet les atomes qui constituent le matériau peuvent présenter des dipôles électrostatiques qui sont susceptibles d'interagir avec un champ électrique sous l'effet de la température. Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation reliée à ce champ électrique, par la susceptibilité électrique[15]

$$\vec{P} = \chi \vec{E} \quad (1.1)$$

Avec

χ : la susceptibilité électrique, c'est une grandeur caractérisant la polarisation créée par

un champ électrique.

\vec{P} : est la polarisation du diélectrique.

\vec{E} est le champ électrique.

Les électrons présents dans un milieu ferroélectrique ne peuvent pas, par définition, se déplacer sur des grandes distances. Ils peuvent par contre présenter des mouvements d'amplitude très petite à notre échelle, mais peuvent être à l'origine de nombreux phénomènes. Ces mouvements sont souvent des mouvements d'oscillation autour du noyau: le nuage électronique peut être déformé et ainsi créer un dipôle électrostatique. Il en va de même pour le déplacement global des atomes au sein du matériau (ils créent également des dipôles).

Polarisation des ferroélectriques

Lors de l'application d'un champ électrique sur un matériau ferroélectrique, les molécules ou atomes dont il est constitué sont déformés de telle manière que les barycentres des charges positives et négatives qui les composent ne coïncident plus, comme le montre la figure ci dessous:

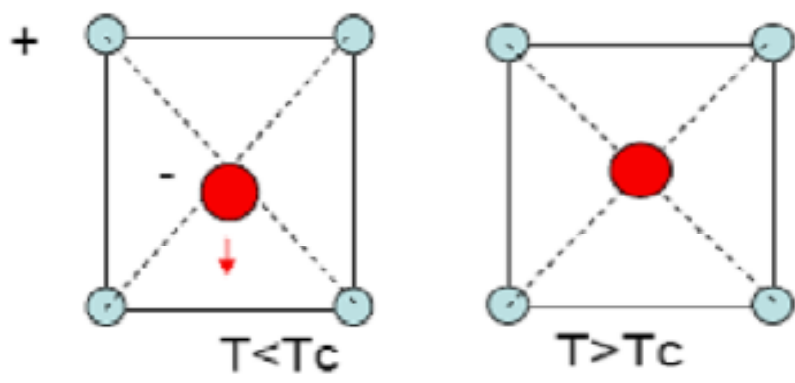


Figure1.2: Moment dipolaire non nul

Figure1.3: Moment dipolaire non nul

Cette situation se présentant pour certaines molécules même en l'absence d'un champ électrique extérieur (exemple, la molécule d'eau). Un tel atome ou une telle molécule pos-

sède ce que l'on nomme un “moment dipolaire électrique” [induit (Les pertes diélectriques sont dues aux mouvements des porteurs de charges, l'effet de ces mouvement est appelé polarisation induite) ou spontané], grandeur qui caractérise à la fois la distance entre ces barycentres et la valeur absolue des charges déplacées. S'il existe, ce moment dipolaire est porté par chacun des “groupements neutres” qui forment le matériau, et l'on définit le vecteur polarisation \vec{P} comme la moyenne volumique de ce moment dipolaire.

Cette polarisation \vec{P} crée elle-même un champ électrique \vec{E} qui se superpose, à l'intérieur du matériau, à un éventuel champ initialement appliqué. Le vecteur polarisation est proportionnel au champ électrique appliqué \vec{E}

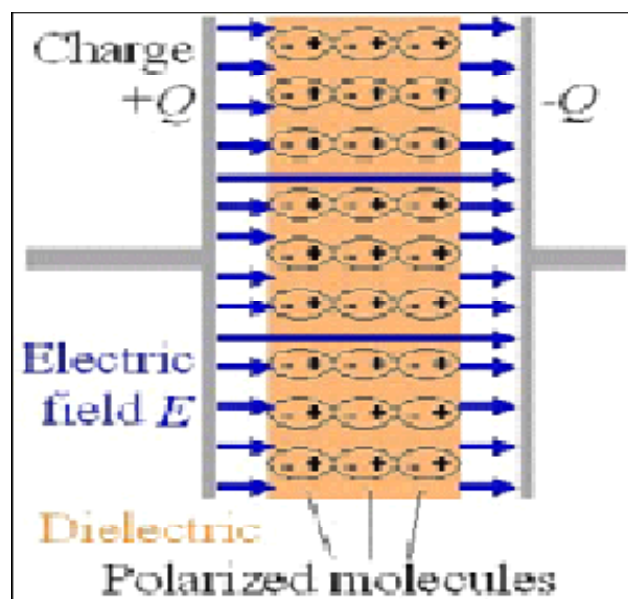


Figure1.4: Polarisation d'un ferroélectrique par un champ électrique appliqué

La polarisation diélectrique $P(t)$ est introduite d'un point de vue macroscopique par l'équation liant le champ électrique $E(t)$ au déplacement électrique $D(t)$:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.2)$$

Constante diélectrique des matériaux ferroélectriques

Les matériaux ferroélectriques sont caractérisés par l'existence d'une température de transition. Cette température, appelée température de Curie T_C , sépare l'état ferroélectrique ($T < T_C$) de l'état paraélectrique ($T > T_C$). La transition entre les deux états s'accompagne d'un changement de structure cristalline.

l'évolution thermique de la constante diélectrique relative réelle ε_r présente à T_C une discontinuité qui se traduit pratiquement par un maximum de ε_r . Dans le domaine paraélectrique, ε_r suit une loi de Curie-Weiss de la forme suivante:

$$\varepsilon_r = \frac{C}{T - T_c} \quad (1.3)$$

Où C est la constante de Curie, T_c la température de Curie ou de transition et T la température absolue.

On peut alors distinguer deux classes de ferroélectriques suivant la valeur de C .

Les matériaux pour lesquels $C \approx 10^3$, tels que les sels de Rochelle, le phosphate de potassium, le sulfate de triglycine.

Les matériaux pour lesquels $C \approx 10^5$, tels que le $BaTiO_3$, $KNBO_3$ et le $BaSrTiO_3$.

1.1.3 Théorie de transition de phase de Landau.

la théorie de Landau est une théorie des transitions de phases. Elle doit son nom au théoricien russe Lev Landau. Cette théorie repose sur un développement polynomial de l'énergie libre en fonction d'un paramètre, appelé paramètre d'ordre, au voisinage de la transition.

Cette théorie s'applique aux transitions de phases marquées par la perte de certains éléments de symétrie.

De fait, la théorie de Landau constitue la première application de la théorie des groupes à la thermodynamique.

Les principes généraux de la théorie ont été posés par Lev Landau en 1937. Par la suite, différents travaux ont appliqué cette théorie générale à des cas plus spécifiques qu'on désigne parfois par des noms légèrement différents : théorie de Ginzburg-Landau pour les supraconducteurs, théorie de Landau-Devonshire pour les ferroélectriques etc.

Une notion très féconde pour classer les transitions fut introduite par L.D. Landau (1937), qui remarqua que le passage d'une phase à l'autre, lors d'une transition sans chaleur latente, s'accompagnait d'un changement de symétrie. À ce changement de symétrie, Landau associa la notion de paramètre d'ordre. Cette grandeur physique, de caractère extensif, est nulle dans la phase la plus symétrique et non nulle dans la phase la moins symétrique. La phase ordonnée, pour laquelle le degré d'ordre est différent de zéro est moins symétrique que la phase désordonnée.

Dans le cas par exemple du sel de Rochelle : le paramètre d'ordre de la transition paraélectrique-ferroélectrique est la polarisation diélectrique. La notion de paramètre d'ordre permet de classer les transitions de la manière suivante,

On distingue deux types de transitions :

Les transitions sans paramètre d'ordre (transition du premier ordre): Si le paramètre d'ordre est discontinu au point de transition; il y a un équilibre entre les deux phases au point de transition. C'est le cas de la transition liquide-gaz ou de la fusion de la glace, par exemple.

Les transitions avec paramètre d'ordre (transition du second ordre): Si le paramètre d'ordre est continu au point de transition; on passe continûment d'une phase à l'autre mais celles-ci ne sont jamais en équilibre l'une avec l'autre. Un exemple de ce type correspond à la transition ferroélectrique-paraélectrique ou le passage d'un supraconducteur à un conducteur. Le matériau Sel de Rochelle possède une transition du second ordre.

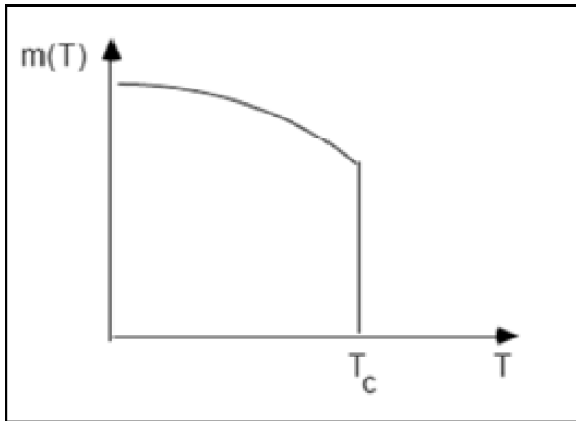


Figure1.5: Paramètre d'ordre1

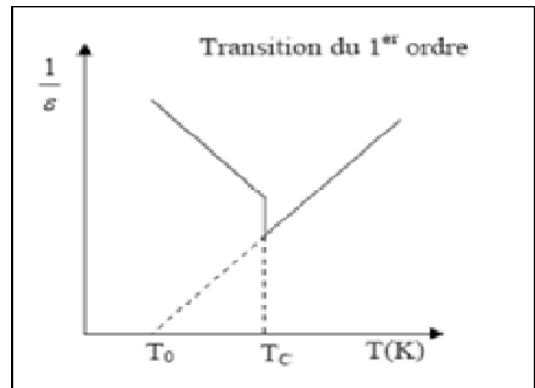


Figure1.6: Inverse de la constante diélectrique

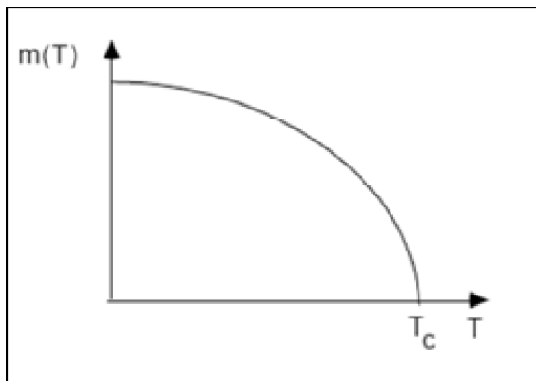


Figure1.7: Paramètre d'ordre2

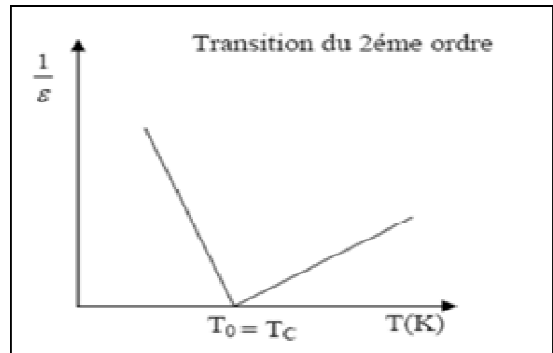


Figure1.8: Inverse de la constante diélectrique

1.2 Comportement dynamique des FeCAP(Ferroelectric capacitor) en fonction de la température

1.2.1 Présentation des FeCAP

Un condensateur non linéaire peut être retrouvé par exemple dans une diode varicap. Cependant, il existe des diélectriques qui peuvent être contrôlé par la température. Ce qui permet la réalisation de condensateur non linéaire.

L'insertion d'un matériau ferroélectrique entre deux armatures conductrices permet

de réaliser un condensateur ferroélectrique non linéaire (FeCAP), contrôlé par la température

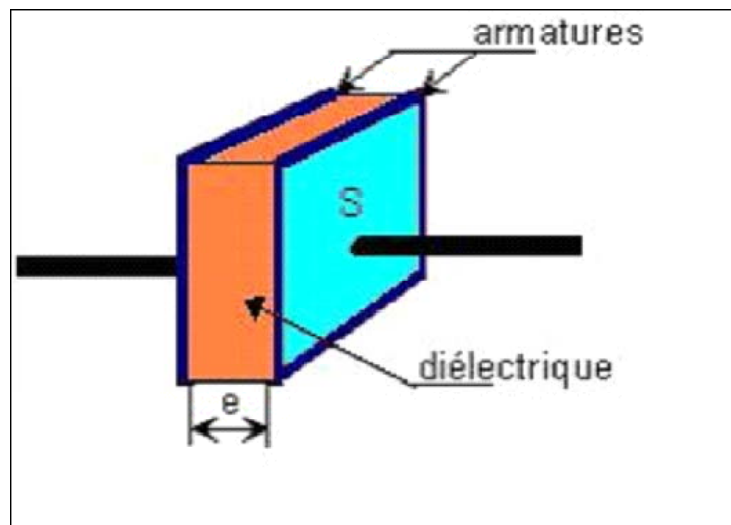


Figure1.9: Vue schématique d'un condensateur ferroélectrique.

L'insertion d'un diélectrique entre deux armatures augmente les capacités des condensateurs car le diélectrique se polarise, comme le montre la figure suivante

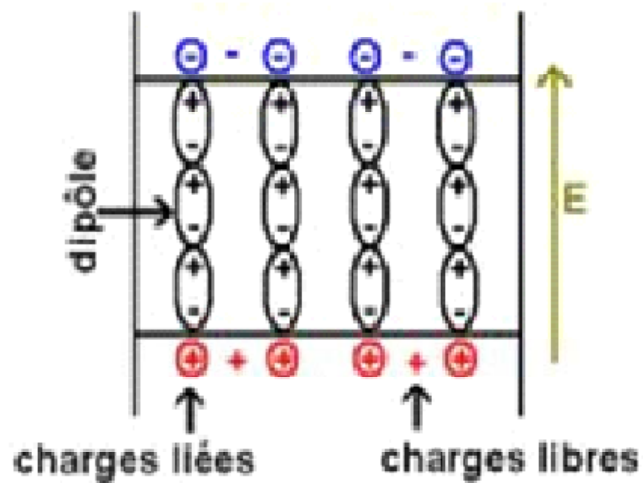


Figure1.10: Polarisation du diélectrique

1.3 Capacité des FeCAP en fonction de la température

Le fait que la capacité du condensateur n'est pas constante et varie en fonction de la température et du champ électrique appliqué, alors il est nécessaire de trouver une relation entre l'induction électrique et le champ électrique appliqué.

Pour trouver cette relation nous avons combiné deux modèles; d'une part le modèle des transitions de phases de Landau, qui nous donne l'expression du potentiel thermodynamique en fonction du paramètre d'ordre η et d'autre part la thermodynamique des diélectriques dans un champ électrique qui exprime la contribution du champ à l'énergie libre du diélectrique

D'après la théorie de Landau, le potentiel thermodynamique Φ du diélectrique peut être présenté en fonction de P (Pression) et T (Température). Si on considère la transition de phase à une pression donnée, la fonction du potentiel thermodynamique peut s'écrire [15]

$$\Phi(P, T) = A(T) = a(T - T_c) \quad (1.4)$$

Où T_c désigne la température de Curie.

D'après la théorie de transition de phase de Landau, l'énergie du diélectrique par unité de volume s'écrit sous la forme de l'équation (1.5) [16]

$$G = \frac{A}{2}D^2 + \frac{B}{4}D^4 \quad (1.5)$$

Où G c'est l'énergie libre du diélectrique

Avec

$$a = 3.18.10^7 Nm^6/C^4.$$

$$T_c = 23.5^\circ C.$$

$$B = 6.5.10^{11} Nm^6/C^4.$$

A l'équilibre, le paramètre d'ordre(polarisation spontanée) est une solution de l'équation (1.6) [15]

$$\frac{\partial G}{\partial D} = 0 \tag{1.6}$$

Faisons la résolution de l'équation (1.6), pour trouver les positions d'équilibre de l'énergie libre

$$\frac{\partial G}{\partial D} = AD + BD^3 = 0 \tag{1.7}$$

On trouve les solutions suivantes [17]:

$$\begin{aligned} D_1 &= 0 \quad \text{Si } T \geq T_c \\ D_2 &= \pm \sqrt{\frac{A}{B}} \quad \text{Si } T \leq T_c \end{aligned} \tag{1.8}$$

les deux solutions de l'équation(1.8), représentant les points d'équilibres dans la phase symétrique et dans la phase la moins symétrique, permettent de constater l'existence de la polarisation spontanée au dessous de la température de Curie

Nous traçons la polarisation spontanée du condensateur ferroélectrique en fonction de la température, sur la figure suivante, en se basant sur l'équation (1.8)

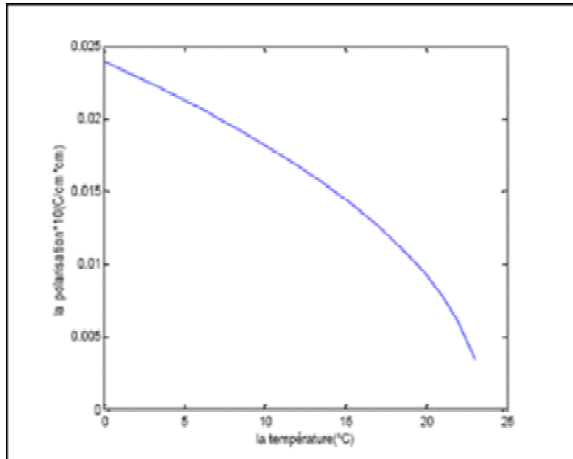


Figure1.11: Polarisation spontanée du Sel de Rochelle en fonction de T

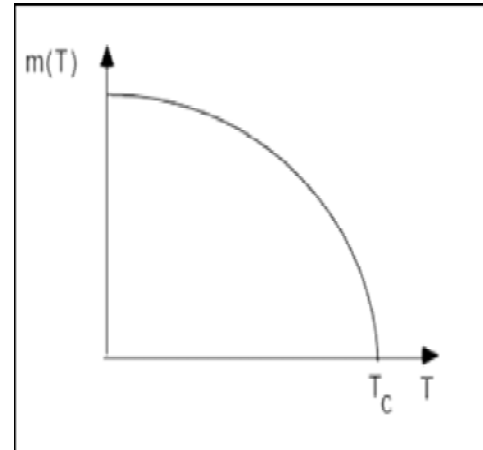


Figure1.12: Évolution de la polarisation spontanée en fonction de T d'après la théorie de Landau

Dans la figure (1.7) le $m(T)$ représente le paramètre d'ordre, qui dans notre cas est la polarisation spontanée $P(T)$.

D'après les figures (1.11) et (1.12), il est clair que la simulation numérique se confond avec la théorie de transition de phase de Landau.

D'autre part, la thermodynamique des diélectriques dans un champ électrique exprime la contribution du champ à l'énergie libre du diélectrique par la relation suivante.

$$dG = E dD \quad (1.9)$$

Avec E le champ électrique appliqué, et D l'induction électrique.

L'équation (1.5) permet avec l'équation(1.9) d'obtenir la relation entre l'induction électrique et le champ électrique appliqué, nous voyons apparaître le terme non linéaire.

$$E = AD + BD^3 \quad (1.10)$$

L'injection de l'équation (1.4) dans l'équation (1.10) met en évidence l'existence d'une relation entre le champ électrique appliqué et l'induction électrique sous la forme de l'équation suivante:

$$E = a(T - T_c) D + BD^3 \quad (1.11)$$

La constante diélectrique, exprimant la propriété du matériau ferroélectrique a s'opposer au passage du courant électrique, est donnée par la relation suivante

$$\varepsilon = \frac{dD}{dE} \quad (1.12)$$

Alors la variation de la constante diélectrique en fonction de la température a la forme suivante

$$\varepsilon^{-1} = a(T - T_c) + 3BD^2 \quad (1.13)$$

Sur les figures ci dessous, nous traçons la variation de la constante diélectrique en fonction de la température[17]

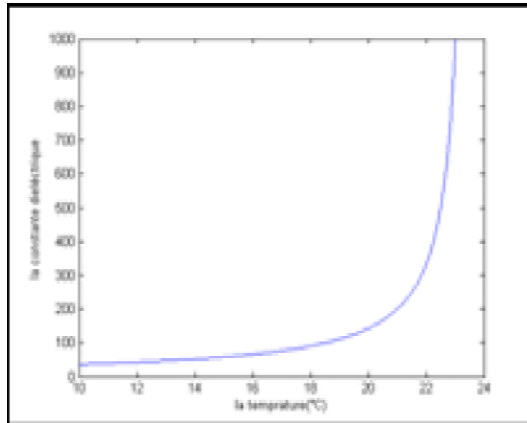


Figure1.13: Évolution de la constante diélectrique pour $T < T_c$

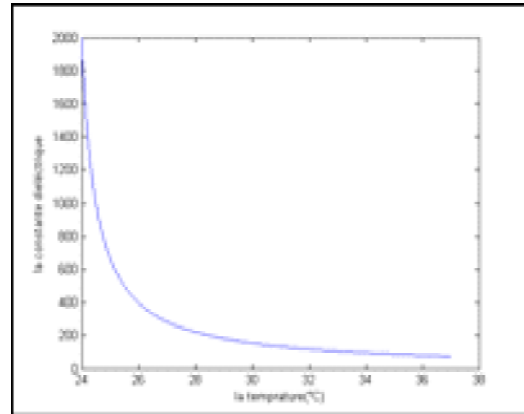


Figure1.14: Évolution de la constante diélectrique pour $T > T_c$

D'après ces deux figures, nous constatons l'existence d'un bon accord avec la théorie [15], où la constante diélectrique atteint son maximum à T_c et elle est de l'ordre de 10^3 .

On est arrivé dans ce chapitre à conclure à :

-D'un point de vue microscopique, on peut dire que notre ferroélectrique change de structure cristalline, il passe d'une structure monoclinique qui lui confère un moment dipolaire permanent à une structure orthorhombique qui est symétrique et par conséquent la somme des moments dipolaires est nulle (absence de polarisation spontanée), dans ce cas c'est comme si nous n'avons rien incéré entre les armatures du condensateur.

-A la température de transition de phase la constante diélectrique atteint sa valeur maximale (10^3), ce qui permet au condensateur d'accumuler le maximum de charge, donc il faut travailler autour de cette température.

DEUXIEME CHAPITRE

**Technologie FeRAM:
la nouvelle mémoire
universelle**

Chapitre 2

Technologie FeRAM: la nouvelle mémoire universelle

2.1 Introduction

Le marché des mémoires non volatiles est très lucratif pour l'industrie de la micro-électronique.

A l'opposé des mémoires volatiles, les mémoires non-volatiles gardent l'information même en l'absence d'alimentation électrique: c'est leur principal intérêt.

Généralement, les mémoires non-volatiles sont considérées selon trois critères qui sont: les limitations imposées par la technologie, les besoins des utilisateurs et enfin les contraintes économiques[18].

Dans ce paragraphe, nous allons détailler les trois grandes générations de mémoires non-volatiles qui sont apparues successivement sur le marché:

- La FeRAM ou mémoire ferroélectrique basée sur les propriétés d'un matériau ferroélectrique à stocker des informations sous la forme de deux états de polarisation distincts

- La MRAM ou mémoire magnéto-résistive basée sur l'aptitude d'un matériau magnétique à conserver des données sous la forme de deux aimantations parallèles ou antiparallèles

-La PCRAM (ou PCM) ou mémoire à changement de phase basée sur la propriété de certains alliages ternaires à stocker l'information sous la forme de deux états différents (amorphe ou cristallisé).

On peut classer ces mémoires non-volatiles en deux catégories principales: les mémoires non-volatiles de type NOVRAM et les mémoires non-volatiles de type ROM (Read Only Memory).

2.2 La mémoire NOVRAM

La NOVRAM (No Volatile RAM) allie dans la même structure la non volatilité des EEPROM (Electrically Erasable and Programmable Read Only Memory) et la très grande vitesse d'écriture et de lecture des SRAM d'après Harari et al [19].

Le fonctionnement de cette structure peut être décrit simplement à l'aide d'un exemple. Dans un ordinateur, le CPU (Central Processing Unit) lit et écrit les données dans la SRAM en fonctionnement normal. Lorsque la SRAM détecte un début de coupure d'alimentation, des circuits spéciaux copient rapidement (en quelques millisecondes) les données de la SRAM vers l'EEPROM, empêchant ainsi la perte des données. Dès que l'alimentation est restituée, les données sont recopiées dans la SRAM et le dispositif fonctionne comme s'il n'y avait eu aucune coupure d'alimentation. Toutefois, la NOVRAM offre une faible densité d'intégration en raison de la surface importante occupée par la cellule SRAM et la cellule EEPROM.

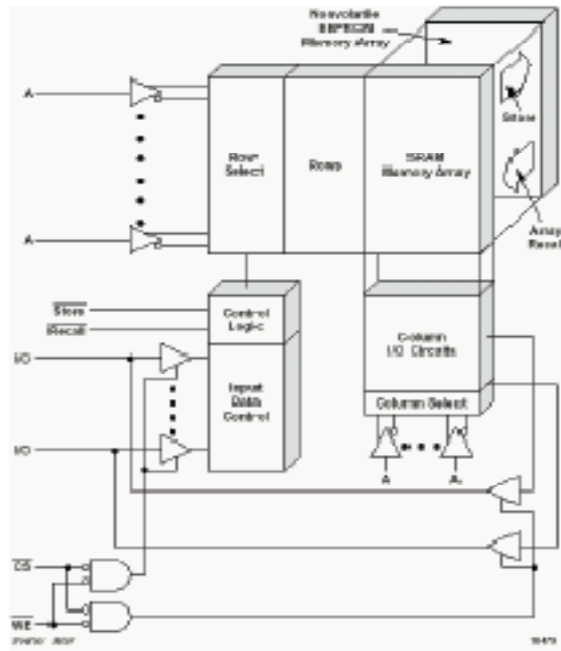


Figure 2.1: Exemple de structure NOVRAM (Source: Xicor)

2.2.1 La mémoire MRAM

Mémoires magnétorésistives, les mémoires MRAM utilisent la propriété de spin des électrons : le spin des électrons en mouvement dans un matériau ferromagnétique polarisé a tendance à s'aligner avec la direction de cette polarisation. Sous l'effet d'un champ magnétique appliqué à un matériau ferromagnétique, on peut modifier la polarisation de ce dernier. Dans cette mémoire, l'information est donc stockée sous forme d'orientation magnétique dans des couches ferromagnétiques. Par l'insertion d'une jonction tunnel (généralement en Al_2O_3) entre deux couches magnétiques (l'une "immobile" et l'autre "libre"), il est possible de mesurer l'orientation magnétique de la couche "libre" par rapport à la couche "immobile". Lorsque leur orientation magnétique respective est parallèle, la résistance tunnel est plus faible. Au contraire, lorsque l'orientation est anti-parallèle, la résistance est plus élevée. L'écriture se fait lorsque sont appliqués deux

champs magnétiques induits par un courant circulant dans la ligne de bit et la ligne de mot d'écriture. L'orientation de la polarisation de la couche magnétique libre est alors modifiée. Pour lire l'état écrit ou effacé de la mémoire, il suffit de mesurer la résistance de la tri-couche par magnéto-résistance en utilisant un transistor MOS. Les mémoires MRAM peuvent être commandées et isolées grâce à des transistors de faible puissance. Etant donné qu'aucun transport de charge ne se fait au niveau de la structure mémoire, les tensions d'écritures et les temps d'écriture sont extrêmement faibles et l'endurance et les temps de rétention sont très élevés. L'utilisation de nouveaux matériaux permettrait d'augmenter le rapport des résistances entre l'état écrit et l'état effacé, considéré comme limitatif pour une miniaturisation au delà du noeud technologique 90 nm. Dernièrement, Freescale a lancé en production une mémoire MRAM de 4Mbits d'après FREESCALE [20].

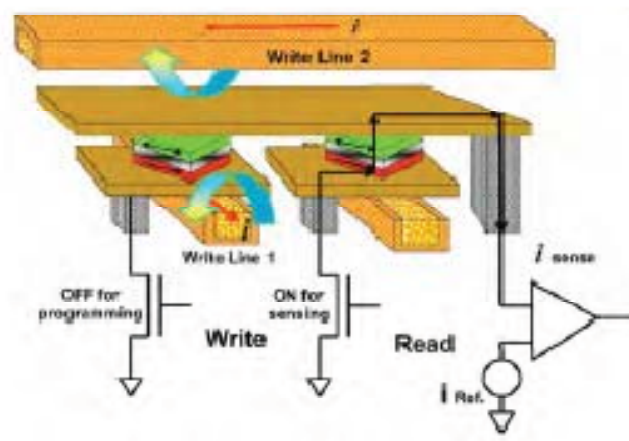


Figure 2.2: Cellule MRAM .D'après[FREESCALE,2006].

2.2.2 La mémoire PCRAM

Mémoires à changement de phase, également appelées mémoires ovoniques unifiées (OUM: Ovonic Unified Memory), exploitent la possibilité pour les verres de chalcogénure de changer de phase de manière réversible sous l'effet de la chaleur. La cellule de base peut

être programmée par effet Joule, et lue en mesurant la différence de résistance entre la phase amorphe et la phase polycristalline.

Cette propriété a été découverte dans les années 70 mais son application n'a vu le jour qu'en 2001 [Lai,2001]. Le film mince de matériau chalcogène ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$) possède une résistance à faible champ qui peut varier de plusieurs ordres de grandeur en fonction de la cristallinité de la phase en présence dans la région active. La programmation de la mémoire requiert l'utilisation d'un courant élevé (typiquement de 1mA en technologie 180nm) pour augmenter la température dans la zone active et permettre une transition de phase locale. Les transitions de phase se font facilement en appliquant des pulses de tension de différentes amplitudes et d'une durée de dizaines de nanosecondes. La lecture de la cellule PCRAM se fait à faible tension. L'intégration des matériaux chalcogènes en technologie CMOS est encore au stade de la recherche et la faisabilité en termes de production de masse et n'a pas encore été démontrée. Cependant, les mémoires PCRAM sont les meilleures candidates pour les prochaines générations de mémoires non volatiles car elles allient à la fois une densité élevée d'intégration et des spécifications de haute performance.

Les cycles "d'écriture/effacement" ont montré une endurance moyenne de 1011 cycles, ce qui est bien meilleur que les mémoires Flash à grille flottante.

2.3 La mémoire ROM

La mémoire ROM (Read Only Memory) est destinée uniquement à être lue. Les ROM elles-mêmes se subdivisent en deux catégories : les ROM pré-diffusées et les ROM programmables, ces dernières pouvant être effaçables par la suite ou non. Elle est programmée soit lors de la fabrication (activation ou non de transistors par masquage), soit par l'utilisateur avec des structures à base de fusibles d'après De Graaf et al [21]. Elle sert par exemple de support au jeu d'instruction des microprocesseurs.

2.3.1 La mémoire EPROM

Une mémoire EPROM (Electrically Programmable Read Only Memory) est écrite électriquement mais peut être effacée avec des rayons ultraviolets. La phase d'écriture peut durer de $100\mu s$ à $1ms$. Quant-à la phase d'effacement, elle nécessite plus de 20 minutes d'exposition aux rayons ultraviolets d'après Brown et al[22]. L'écriture se fait par injection d'électrons chauds à travers l'oxyde qui sépare la grille flottante du canal du transistor MOS. La figure ci dessous montre une cellule EPROM constituée d'un seul transistor, ce qui permet une haute densité d'intégration, comparable à celle des DRAM d'après Maes et al [23].

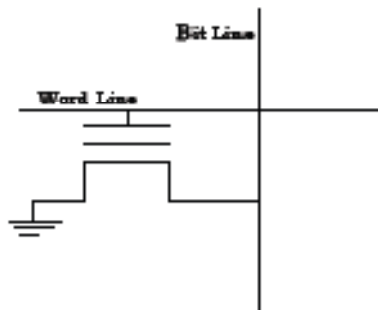


Figure2.3: Représentation schématique d'une mémoire EPROM.

2.3.2 La mémoire Flash EEPROM

La mémoire Flash EEPROM est née de la recherche d'une cellule EEPROM qui, en plus d'être effaçable électriquement, peut également offrir une grande densité d'intégration. Une telle structure est réalisable en utilisant une cellule mémoire composée d'un seul transistor à grille flottante écrite à l'aide d'une injection d'électrons chauds (a), et effacée par injection Fowler-Nordheim (b).

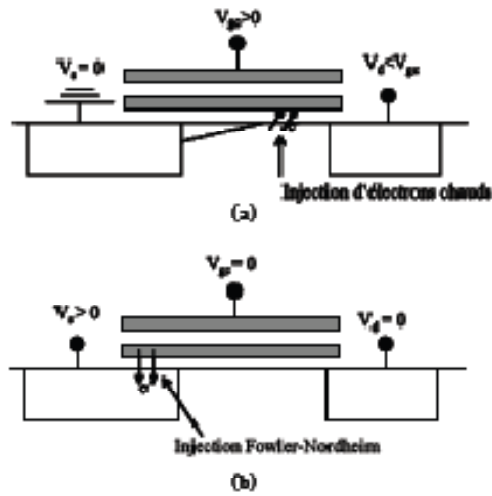


Figure 2.4: Cellule Flash EEPROM écrite par injection d'électrons chauds (a) et effacée par injection Fowler-Nordheim (b).

Les différentes technologies énumérées précédemment ont chacune des avantages et des inconvénients. Pour certaines technologies, les efforts entrepris dans la compréhension des mécanismes de dégradation ont permis de mettre au point des structures plus fiables (SONOS). Cependant, des critères de coût et de compatibilité avec les technologies standard limitent leur domaine d'utilisation.

C'est pourquoi il est important de poursuivre l'étude et l'amélioration des technologies classiques déjà industrialisées.

2.4 Principe de fonctionnement des FeRAM

2.4.1 Structure de la FeRAM

FeRAM, acronyme de “Ferroelectric Random Access Memory ” (mémoire ferroélectrique à accès aléatoire), est une mémoire non volatile capable de conserver des données même en cas de mise hors tension. En dépit de son nom, la mémoire FeRAM est une mémoire ferroélectrique qui n’est pas affectée par les champs magnétiques, car sa puce ne contient aucun matériau ferreux. Les matériaux ferroélectriques changent de polarité lorsqu’ils entrent en contact avec des champs électriques, mais sans être affectés par les champs magnétiques.

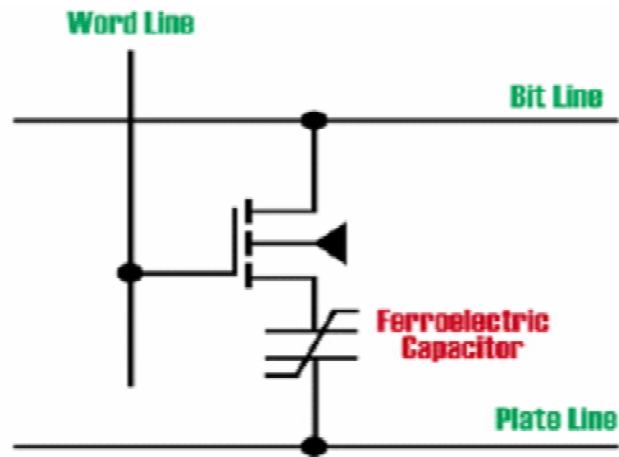


Figure2.5: Structure standard d’une FeRAM
(1 transistor pour 1 condensateur)

La Figure (2.5) présente la structure d’une cellule mémoire FeRAM dans sa configuration la plus simple, chaque cellule étant composée d’un condensateur ferroélectrique commandé par un transistor MOS (structure 1T/1C). Il existe cependant d’autres types d’architectures de mémoire pour lesquels le nombre de condensateurs et de transistors peut varier. Pour l’instant, la majorité des FeRAM déjà produites possèdent une architecture 2T/2C (2 transistors pour 2 condensateurs) très fiable mais très encombrante.

La tendance actuelle est donc de passer à une architecture 1T/1C (Sheikholeslami, 2002) permettant de réduire de 60% la dimension de la cellule. Dans tout les cas de figure, le contrôle de la tension aux bornes du condensateur est assuré par trois lignes conductrices appelées "Word Line", "Bit line" et "Plate line".

2.4.2 Stockage de l'information

Il est important de noter que la donnée binaire (0 ou 1) est stockée dans le condensateur ferroélectrique (FeCAP). Sa capacité à retenir l'information est donc l'un des principaux paramètres à optimiser pour assurer la fiabilité de la mémoire.

Tout matériau ferroélectrique peut voir son état de polarisation renversé sous l'effet d'un champ électrique externe. Pour ce faire, il est subdivisé en régions de polarisations indépendantes (les domaines ferroélectriques) dont l'arrangement évolue avec la tension. Cette dernière, appliquée aux bornes du matériau par l'intermédiaire des électrodes conductrices, entraîne une croissance et une réorientation des domaines dans la direction du champ électrique appliqué et permet de parcourir un cycle d'hystérésis (P, E).

La Figure suivante représente le cycle d'hystérésis, les points A et D de ce cycle correspondent aux deux états de polarisation à champ électrique nul. Ces deux états de polarisation rémanente confèrent à la mémoire son caractère non volatile. Ainsi, les états logiques "0" et "1" du codage binaire correspondent respectivement aux deux états de polarisation rémanente P_{r+} et P_{r-} . D'autre part, les points B et E correspondent aux deux états de polarisation nulle (champs coercitifs E_{c+} et E_{c-}). Enfin les points C et F sont associés aux deux états de polarisation à saturation P_{max} .

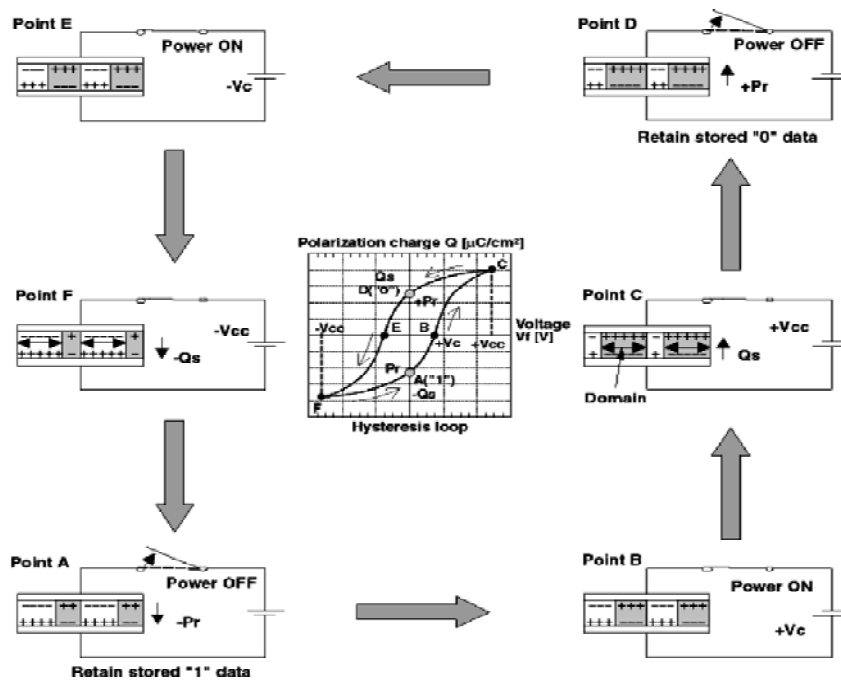


Figure 2.6: Cycle d'hystérésis d'un matériau ferroélectrique.

2.4.3 Principe d'écriture et de lecture de la FeRAM

Pour écrire l'état logique "0", quel que soit l'état initial du matériau ferroélectrique, il suffit d'appliquer un champ électrique positif supérieur au champ coercitif E_{c+} (point B de la Figure 2.6). Après annulation du champ électrique appliqué, le matériau retourne spontanément dans l'état de polarisation P_{r+} correspondant au "0" binaire. Selon le même principe, l'application aux bornes du condensateur d'un champ électrique négatif inférieur au champ coercitif E_{c-} (point E de la Figure 2.6) permet de fixer la polarisation dans l'état rémanent négatif et ainsi d'inscrire un "1".

Une fois ces informations inscrites, il est nécessaire de pouvoir les lire de manière fiable et rapide. Cette étape s'effectue grâce à l'application d'un champ électrique supérieur au champ coercitif E_{c+} et ce quel que soit l'état logique initial:

- Si l'information stockée est un 0, l'application d'une tension positive permet à la polarisation de suivre la courbe "0" \rightarrow C de la Figure 2.7. Il est important de souligner

que le signe de la polarisation n'est pas modifié au cours de l'étape de lecture: c'est la polarisation de non-switching : P_{nsw} . Le courant électrique généré par le flux de charges associé à la polarisation de non switching est appelé j_0 .

– Dans le cas où l'information stockée est un 1 (état $Pr-$), l'application d'une tension supérieure à la tension coercitive renverse l'état de polarisation (selon la courbe "1" \rightarrow C de la Figure 2.7). Ce renversement ou switching de polarisation (P_{sw}) est caractérisé par l'apparition d'un courant j_1 tel que $j_1 > j_0$. L'analyse, par un comparateur, des courants j_0 et j_1 permet alors de distinguer les deux états de polarisation initialement inscrits dans la mémoire et ainsi de lire l'information.

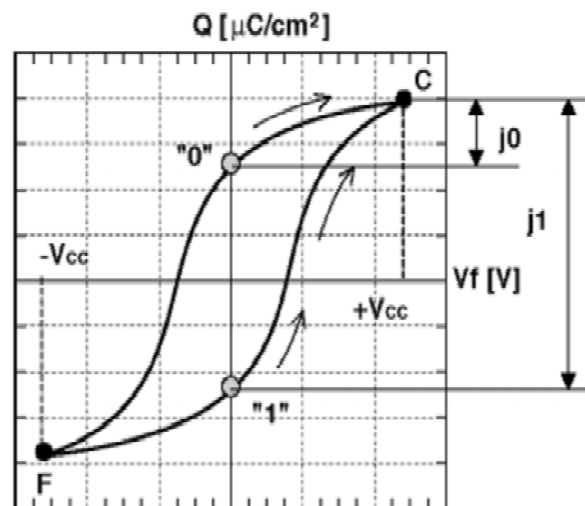


Figure 2.7: Principe d'écriture/lecture d'une cellule mémoire FeRAM.

2.5 Intérêt de l'utilisation du matériau ferroélectrique

L'utilisation d'un matériau ferroélectrique dans la fabrication des FeRAM est très importante, en effet L'intégration d'un condensateur ferroélectrique dans une architecture silicium submicronique (technologie CMOS inférieure à $0,35\mu\text{m}$) impose le respect d'un certain nombre de spécifications (Jones et al., 1995; Ramesh et al., 2001; Mikolajick et al., 2001) :

- Les mémoires doivent être programmables sous des tensions inférieures à 3V . Ceci

exige l'utilisation d'un matériau ferroélectrique capable de switcher à de faibles tensions (faible champ coercitif) ;

- Il est préférable que la couche ferroélectrique soit orientée de telle manière que la polarisation soit perpendiculaire au plan du substrat (Suzuki & Ami, 1996) ;

- La réduction de l'épaisseur de la couche ferroélectrique, imposée par la diminution de la tension de programmation, ne doit pas dégrader ses propriétés diélectriques ;

- Les condensateurs ferroélectriques doivent être capables de supporter un grand nombre de cycles de programmation, i.e. avoir une grande endurance.

Actuellement, plusieurs matériaux ferroélectriques sont à l'étude pour leur intégration dans les FeRAM.

2.5.1 Quels sont les principaux avantages d'une mémoire FeRAM par rapport à une mémoire Flash ou EEPROM ?

La mémoire FeRAM est une mémoire capable de conserver ses données même en cas de mise hors tension. Semblable à la technologie DRAM (Dynamic Random Access Memory) couramment utilisée sur les mémoires (principales) grande capacité des ordinateurs, stations de travail et consoles de jeu non portatives (telles que la PlayStation), la technologie FeRAM requiert une restauration de mémoire après chaque opération de lecture. Une restauration de mémoire a lieu car, comme pour la technologie DRAM, les cellules de mémoire FeRAM exigent qu'à chaque fois qu'elles accèdent à un bit, celui-ci soit réécrit par le biais d'une fonction de rafraîchissement.

La mémoire FeRAM présentant une endurance d'écriture quasiment inépuisable (100 trillions de cycles de lecture/écriture), cela ne pose aucun problème d'ordre pratique, elle présente aussi un certain nombre d'avantages par rapport à ces concurrentes..

1– La vitesse: La mémoire FeRAM offre des temps d'écriture ultra-rapides. Au-delà de toutes les autres opérations, le temps réel requis par une opération d'écriture sur une cellule de mémoire FeRAM est inférieur à 50 ns. Cela représente une vitesse près de 1 000 fois supérieure à celle d'une mémoire EEPROM. En outre, contrairement à la mémoire

EEPROM où deux étapes s'avèrent nécessaires pour effectuer une opération d'écriture de données (une commande d'écriture suivie d'une commande de lecture/vérification), la fonction d'écriture de la mémoire FeRAM s'effectue au cours du même processus que celui de la mémoire de lecture. Il n'y a qu'une seule commande d'accès à la mémoire, une étape dédiée à la lecture ou à l'écriture. Par conséquent, la totalité du temps associé à une opération d'écriture avec une mémoire EEPROM est éliminé sur une plate-forme à circuit intégré intelligente utilisant la technologie FeRAM.

2— Une consommation ultra-basse: Les opérations d'écritures sur une cellule de mémoire FRAM s'effectuent à une faible tension et seule, une infime quantité de courant s'avère nécessaire pour modifier les données. Une mémoire EEPROM requiert des tensions élevées. La mémoire FRAM consomme très peu: 1,5 V par rapport à une mémoire EEPROM, dont la consommation se situe entre 10 et 14V. La faible tension requise par la mémoire FRAM se traduit par une consommation très basse et offre une fonctionnalité améliorée à des vitesses plus élevées.

3— La fiabilité des données: Étant donné que seule une infime quantité d'énergie s'avère nécessaire, toute la puissance requise par la mémoire FeRAM est accumulée en amont, dès le début d'une opération d'écriture de données. Cela permet d'éviter les "ruptures de données", l'écriture partielle des données qui se produit lorsque les plates-formes à circuit intégré intelligentes fonctionnant sur mémoire EEPROM sont coupées de la source d'alimentation du champ RF au cours d'un cycle d'écriture. En outre, la mémoire FeRAM peut effectuer plus de 100 trillions de cycles de lecture/écriture, surpassant ainsi de très loin le nombre permis par une mémoire EEPROM. Développement de la FeRAM dans l'industrie microélectronique.

Les produits FeRAM ont prouvé leur succès commercial sur le marché des semi-conducteurs, avec plus de 150 millions d'unités vendues, uniquement par Ramtron. La mémoire FeRAM de Ramtron a acquis une popularité croissante au sein de secteurs hautement qualitatifs tels que l'automobile. Des constructeurs comme Mercedes, GM, BMW, Ford, Porsche et de nombreux autres utilisent désormais la technologie FeRAM

sur leurs véhicules.

TI fabrique actuellement la mémoire FeRAM 4 Mo et 2 Mo de Ramtron dans le cadre de son procédé de fabrication FeRAM avancé de 130 nanomètres (nm).

La mémoire FeRAM 4 Mo de Ramtron a été désignée Meilleur produit de l'année 2008 par le magazine Electronic Products China (EPC).

Pour conclure ce chapitre de la technologie FeRAM, le tableau 2.1 résume une comparaison des performances des différentes mémoires non volatiles[18].

	<i>EEPROM</i>	<i>Flash</i>	<i>FeRAM</i>	<i>MRAM</i>	<i>PCRAM</i>
<i>Non volatile</i>	oui	oui	oui	oui	oui
<i>Technologie MOS</i>	0,35 μm	0,15 μm	0,18 μm	0,35 μm	0,10 μm
<i>Surface de cellule</i>		0,19 μm^2	0,68 μm^2	4,9 μm^2	0,06 μm^2
<i>Miniaturisation</i>	Pauvre	Moyenne	Pauvre	Pauvre	Bonne
<i>Endurance</i>	10^6	10^5	10^{12}	$>10^{14}$	10^{12}
<i>Temps écriture/lecture</i>	ms	30 ns (lecture) 1 ms (écriture)	<100 ns	<100 ns	<100 ns
<i>Consommation d'énergie</i>	10 V x 100 μA (1000 mW)	5 V x 1 mA (5000 mW)	3 V x 100 μA (300 mW)	1,8 V x 10 mA (1800 mW)	3 V x 1 mA (3000 mW)
<i>Maturité</i>	production de masse	production de masse	production limitée	Véhicules de test	Véhicules de test
<i>Acteurs sur le marché</i>	ST Microelectronics, Atmel...	AMD, Intel, ST, Atmel...	Fujitsu, Ramtron, Texas Instrument, Infineon, ST...	IBM, Motorola, Infineon...	BAE, Ovonyx, Intel, ST

Tableau 2.1: comparaison des performances des différentes mémoires non volatiles.

2.5.2 Limitations de la technologie FeRAM

La technologie FeRAM, bien que très avantageuse en terme de consommation d'énergie et de vitesse d'écriture/lecture, possède toutefois plusieurs limitations fondamentales. La capacité à passer outre ces désavantages va, en majeure partie, conditionner le développement de la mémoire à grande échelle. Deux grands types de limitations peuvent être distingués: les limitations extrinsèques dues à l'introduction de matériaux oxydes dans

les lignes de fabrication (contamination par les oxydes, étapes de gravure). Ce problème est commun aux technologies MRAM, PCRAM et FeRAM. Il existe également des limitations intrinsèques à la technologie FeRAM liées au caractère ferroélectrique lui-même:

- L'un des grands enjeux pour assurer le développement et la pérennité de la technologie FeRAM est la possibilité de suivre la miniaturisation constante de l'architecture silicium submicronique. Les matériaux ainsi choisis doivent continuer à présenter un caractère ferroélectrique à très faible épaisseur. Ceci constitue un obstacle au développement des mémoires ferroélectriques, car la frontière de persistance de ces propriétés à très petite échelle est encore très mal définie. Aujourd'hui, de nombreux groupes de recherche travaillent sur la conservation des propriétés électriques à l'échelle nanométrique (Tybell et al.[24]; Tiedke et al.[25]; Junquera & Ghosez[26]; Chu et al[27]).

- La "lecture destructive" imposant une réécriture de l'information après lecture constitue la seconde limitation intrinsèque de la technologie. Le nombre de cycle d'écriture/lecture est ainsi considérablement augmenté. Pour répondre à ce problème, deux solutions sont possibles:

(i) la première consiste à concevoir une architecture novatrice du point mémoire présentant une lecture non destructive. C'est le cas, par exemple des transistors ferroélectriques à effet de champ (FeFET) (Ishiwara[28]).

(ii) La seconde concerne le choix et l'optimisation d'un matériau ferroélectrique dont les caractéristiques électriques soient peu affectées par le cyclage (cas de SBT et BLT).

TROISIEME CHAPITRE

**Influence de la température
sur le mode de fonctionnement
des FeRAM**

Chapitre 3

Influence de la température sur le mode de fonctionnement des FeRAM

3.1 Introduction

Le chapitre précédent s'est attaché à présenter les différents types de mémoire, et plus particulièrement la FeRAM pour les avantages qu'elle présente en technologie des circuits intégrés. De part leur fort taux d'agilité, leur potentiel d'intégration élevé et leur forte permittivité, les ferroélectriques possèdent des propriétés bien adaptées à ce type d'applications. Cependant, les performances des dispositifs utilisant des ferroélectriques, comme tout autre matériau d'ailleurs, sont très étroitement liées aux propriétés physiques du matériau et plus précisément à la température.

L'objectif de ce présent chapitre est de présenter les considérations importantes de physique qui nous ont permis d'étudier le mode de défaillance des FeRAM. La connaissance de la relation entre la température et l'induction électrique du matériau ferroélectrique est un très grand succès, car elle nous permet de comprendre le mode de fonctionnement des mémoires FeRAM.

Après avoir trouver cette fameuse relation liant la température à l'induction électrique, on peut résoudre notre problème numériquement en utilisant la méthode de Runge Kutta d'ordre quatre dans l'environnement Matlab 7, pour mieux percevoir le phénomène de défaillance des FeRAM.

Le matériau ferroélectrique utilisé est le Sel de Rochelle ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6, 4\text{H}_2\text{O}$).

3.2 Modélisation de la FeRAM

La réduction continue des dimensions des transistors et des condensateurs conduit aujourd'hui l'industrie de la microélectronique à relever un grand défi technologique. En effet, en impliquant des épaisseurs de silice de plus en plus faibles, cette réduction de taille sera à l'origine de courants de fuites excessifs par effet tunnel. L'une des solutions envisagées pour remédier à ce problème est le remplacement de silice par un oxyde de plus forte permittivité diélectrique tel que les matériaux ferroélectriques.

Les études menées entre 2003 et 2005 à l'ICMCB ont abouti à la sélection d'un grand nombre de familles d'oxydes candidats à la substitution de silice. Parmi ces familles structurales, on peut citer: NaCl, Fluorine, Perovskite, ferroélectrique. Plus d'une soixantaine d'oxydes appartenant à ces différentes familles ont été étudiées.

L'augmentation de la capacité des condensateurs dans la nouvelle technologie, exige la présence de matériaux ferroélectrique entre ces armatures au lieu d'avoir de l'air. Cependant ce chapitre va être divisé en deux parties:

-La première partie est consacrée à la présentation du mode de fonctionnement du condensateur ferroélectrique (FeCAP).

-Dans la deuxième partie, on s'intéresse au mode de fonctionnement des transistors FeFET.

3.2.1 Modélisation du condensateur ferroélectrique

les appareillages électroniques intègrent de plus en plus de fonctionnalités dans des volumes de plus en plus restreints. Une course est donc engagée pour essayer de réduire au maximum la taille des composants tout en augmentant leurs propriétés.

les condensateurs ont depuis longtemps dépassé leur fonction première d'accumulateurs de charges pour prendre une grande importance dans le filtrage de signaux. Ils occupent donc une grande partie de la place dans les appareillages électroniques modernes. L'augmentation de l'efficacité de ces condensateurs a d'abord été réalisée en jouant sur leurs facteurs géométriques. Ainsi, changer la forme planaire pour une forme cylindrique et/ ou en feuillet a permis d'obtenir un meilleur gain de stockage de charge sur un condensateur plan classique, mais dans ce cas, on a remarqué la naissance de courant de fuite I_f .

Aujourd'hui la solution, est de placer un matériau ferroélectrique entre les plaques du condensateur, c'est à dire la construction de FeCAP(ferroelectric capacitor).

La capacité du condensateur ferroélectrique(FeCAP)

Tous les condensateurs "non linéaire" nécessitent la présence d'un diélectrique et tous les diélectriques utilisés ne sont pas forcément de la même nature. Certains sont réalisés avec des films plastiques, d'autre de solutions électrolytiques solides, d'autres encore de verre, de mica, de papier et bien sûr certains composés de ferroélectriques. On va donc exprimer la capacité d'un condensateur en tenant compte de sa géométrie mais aussi des caractéristiques physiques du diélectrique. Ainsi pour un condensateur ferroélectrique plan représenté sur figure(1.9), la capacité est donnée par l'équation suivante:

$$C = \varepsilon \frac{S}{e} \quad (3.1)$$

S et e sont respectivement la surface et la distance entre les électrodes et ε la constante diélectrique du Sel de Rochelle.

Avec $S = 10^4 m$, $e = 2.10^5 m$

La permittivité relative ε_r s'obtient en combinant l'équation (1.1) à la définition du vecteur induction électrique \vec{D} et aux équations de Maxwell:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \\ \vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \Rightarrow \varepsilon_r = 1 + \chi \\ \vec{P} &= \varepsilon_0 \chi \vec{E}\end{aligned}\tag{3.2}$$

La permittivité diélectrique ε , abusivement appelée aussi constante diélectrique, est le produit de la permittivité du vide par la permittivité relative

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r\tag{3.3}$$

Avec $\varepsilon_0 = 8.85.10^{-12} F/m$

L'injection de l'équation (1.13) dans l'équation (3.1), permet de trouver la relation entre la température du Sel de Rochelle et la capacité du condensateur, comme suit:

$$C = \frac{S}{e(a(T - Tc) + 3BD^2)}\tag{3.4}$$

D'après l'équation (3.4), il est clair que l'introduction du Sel de Rochelle($Tc = 23.5^\circ C$) dans la fabrication du condensateur de la mémoire FeRAM, provoque une non linéarité du circuit, puisque la capacité de celui-ci varie d'une façon non linéaire avec la température.

D'autre part, dans une mémoire FeRAM, le condensateur est relié en série avec une résistance, d'où le modèle mathématique du condensateur(FeCAP), après application des lois de Kirchhoff [29]

$$\frac{dD}{dt} + \frac{eA}{RS}D + \frac{eb}{RS}D^3 = \frac{U}{RS}e^{(i\omega t)}\tag{3.5}$$

Où

$$A = a(T - T_c) \tag{3.6}$$

$$b = 3B$$

Avec $R = 20m\Omega$

On peut tracer l'induction électrique du condensateur ferroélectrique en fonction de la température dans les deux phases (ferro-paraélectrique), en s'appuyant sur l'équation (3.5)

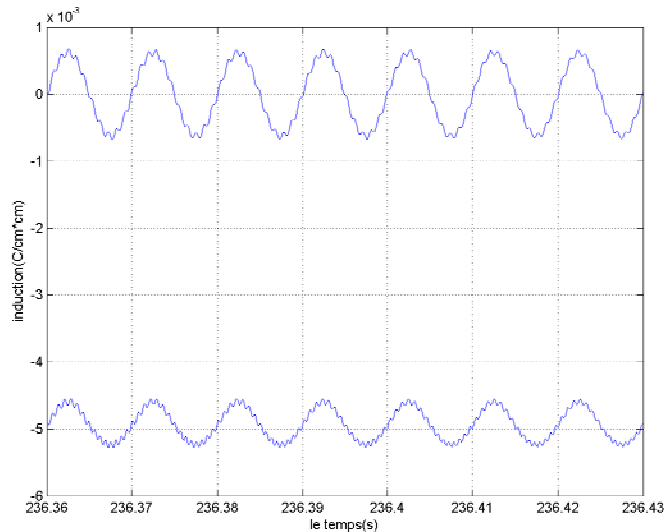


Figure3.1: Variation temporelle de l'induction électrique en fonction de la température

D'après la figure(3.1), on remarque que lorsque la température est au dessous de la température de Curie($T_c=23.5^\circ C$), l'induction électrique dans le condensateur existe et présente quelques petites perturbations dans la phase paraélectrique, donc il y a un bon accord avec la littérature(théorie de Landau). En pratique ceci se traduit par la présence de moments dipolaires qui, par la suite peuvent changer de direction en appliquant un champ électrique.

Maintenant, on se place dans le cas d'un circuit non excité(on enlève la source de tension), dans ce cas on considère que le condensateur est chargé.

l'équation (3.5) devient:

$$\dot{D} + \frac{eA}{RS}D + \frac{eB}{RS}D^3 = 0 \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) à la forme d'une équation de Bernoulli, sa résolution se fait en utilisant la méthode de la dérivation de la constante [17].

La solution de l'équation (3.7) nous donne la loi de comportement de l'induction électrique en fonction de la température au cours du temps:

$$D(t) = \frac{1}{\sqrt{\frac{p \exp(-mt)}{m}}} \quad (3.8)$$

Avec :

$$p = \frac{e3B}{RS} \quad m = \frac{ea(T - T_c)}{RS}$$

Après avoir trouver la loi de comportement de l'induction électrique on peut tracer sa variation en fonction de la température au cours du temps.

Pour $T < T_c$

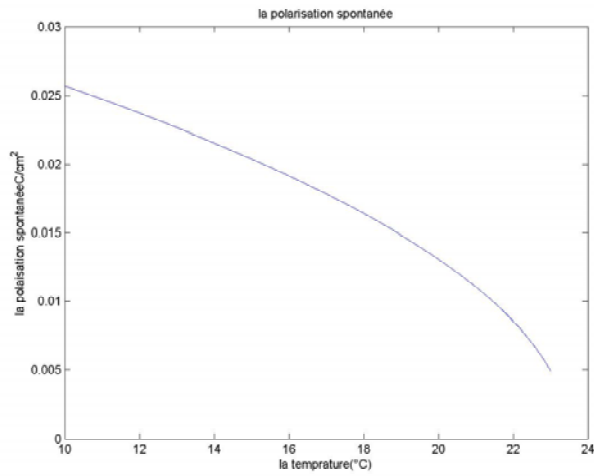


Fig3.2 L'induction électrique pour $T < T_c$

On remarque que la polarisation spontanée de notre diélectrique (Sel de Rochelle) est de $0.0025C/cm^2$, elle diminue en fonction de la température. Notre condensateur est supposé initialement chargé, il joue le rôle d'un générateur.

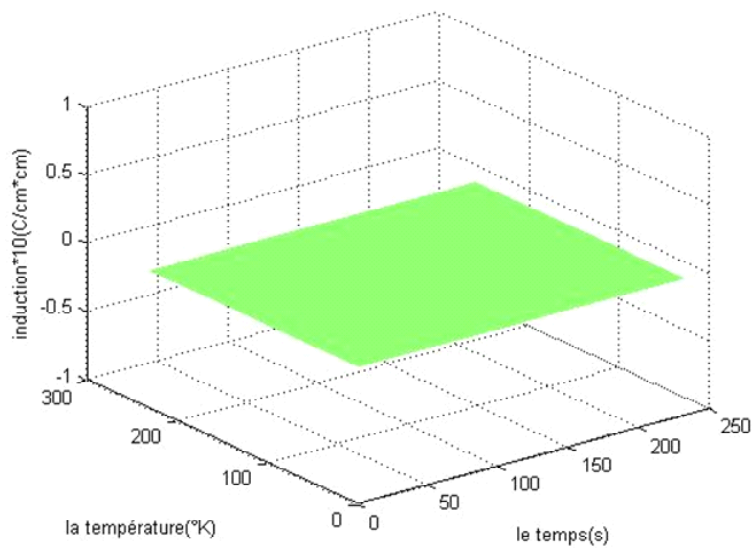


Fig3.3 L'induction électrique pour $T > T_c$

les figures 3.2 et 3.3, illustrent le phénomène de transition de phase que subit notre diélectrique ainsi que le changement de ses propriétés microscopiques.

Pour $T < T_c$, l'agitation thermique est faible, il en résulte une polarisation spontanée. Mais pour $T \geq T_c$ l'agitation thermique est forte, la polarisation est nulle et par conséquent l'induction électrique n'a plus lieu car les barycentres des charges positives et négatives de la maille élémentaire sont distincts.

3.2.2 Modélisation du transistor FeFET

Introduction

Un transistor est un composant semi-conducteur actif fondamental, utilisé en électronique comme interrupteur commandé, pour amplifier, stabiliser une tension, ou moduler un signal. Il a été découvert en 1947 par John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain. On distingue plusieurs types de transistors, répartis en deux grandes familles: les transistors bipolaires et les transistors à effet de champ.

-Les premiers sont réalisés dans un même monocristal semi-conducteur, divisé en trois régions dopées différemment (pnp ou npn) et formant deux jonctions montées en opposition avec une zone commune. Ici, deux types de porteurs participent à la conduction: les électrons (n) et les trous (p).

-Les transistors à effet de champ correspondent à des dispositifs constitués de quatre électrodes: la source, le drain, la grille et le substrat. Contrairement aux transistors bipolaires, un seul type de porteurs de charge (électrons ou trous) participe à la conduction. De plus, le mode de conduction est surfacique, à l'opposé des transistors bipolaires où l'on assiste plutôt à une conduction en volume.

Dans le cadre de notre travail, nous allons nous intéresser uniquement aux transistors à effet de champ et plus précisément au ferroelectric field effect transistor (FeFET).

Transistor FeFET

Les premiers travaux sur le concept du transistor Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET ou MOS) datent de 1926-1930 avec le brevet déposé par Lilienfeld et Heil [30], [31]. En 1955, I. Ross mit en place la structure actuelle du transistor MOS; mais, à la place de l'oxyde de grille, on a alors plutôt un cristal ferroélectrique[32]. C'est en 1960 que Kahng et Atalla présentent le premier transistor MOS en silicium complètement opérationnel, avec, comme oxyde de grille, l'oxyde de silicium. C'est le point de départ de l'essor de l'industrie du circuit intégré. Dans la vie de tous les jours, les transistors se retrouvent dans les cartes à puces (environ 1000 transistors), les agendas électroniques PDA (environ 5 millions de transistors), les téléphones portables (environ 10 millions), les clés USB (environ 1 milliard de transistors pour une clé de 128 Mo), la principale application étant bien sûr celle des microprocesseurs (environ 820 milliards de transistors pour le « Core 2 Quad » d'Intel).

Structure et fonctionnement du transistor FeFET

Le transistor MOS est un commutateur qui permet de commander sous l'action d'un champ électrique, le passage d'un courant à travers un canal séparant deux réservoirs de porteurs de charge distincts: la source et le drain (S et D)[32], [33]. Sa structure est la suivante: sur un substrat semi-conducteur de type donné (p ou n), on vient créer par diffusion d'impuretés (dopantes), deux contacts ou électrodes (la source et le drain) dont le type de conduction diffère de celui du substrat. L'ensemble est ensuite isolé d'une électrode métallique, la grille, par une fine couche de diélectrique (oxyde de grille: ferroélectrique), comme le montre la figure suivante

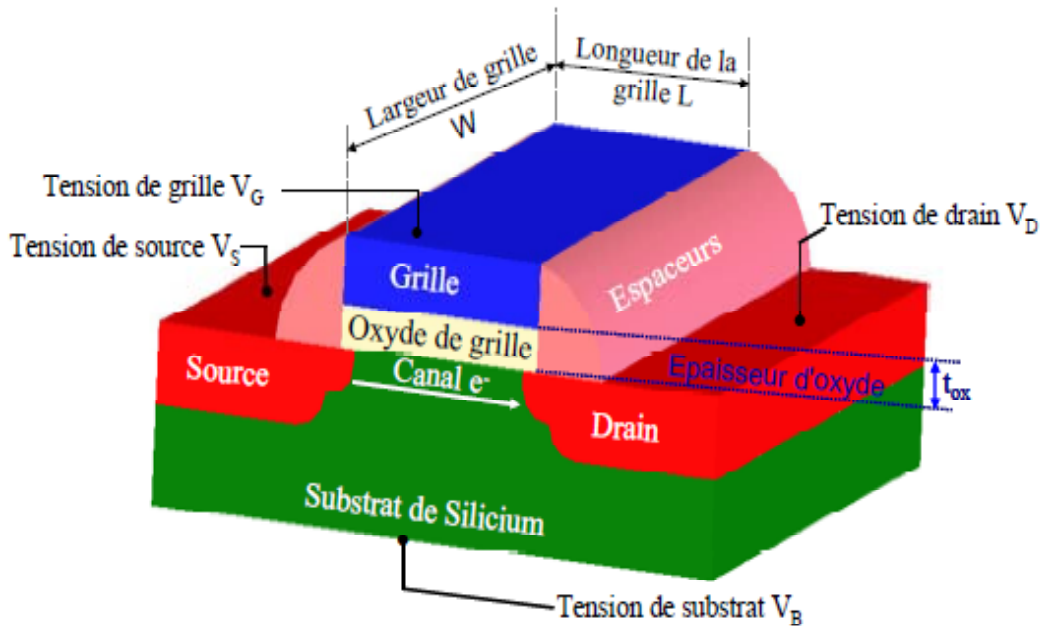


Figure3.2: Structure d'un transistor MOSFET

On applique une tension alternative sur la FeRAM, de la forme suivante:

$$U = U_0 e^{i\omega t} \quad (3.9)$$

$$\omega = 2\pi f$$

Avec

$U_0 = 20V$: L'amplitude de la tension appliquée.

$\omega = 2\pi \cdot 100$ la pulsation.

t : le temps.

Alors la tension au borne du transistor prend la forme de l'équation suivante:

$$U_{DS} = \frac{I_{DS} \cdot T_{ox} \cdot L}{\mu^* \epsilon \epsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z} \quad (3.10)$$

Avec

μ^* la mobilité des charges du canal

U_{GS} tension entre la grille et la source

U_{DS} tension entre le drain et la source

I_{DS} l'intensité entre le drain et la source

T_{ox} l'épaisseur de l'oxyde ferroélectrique

q la charge électrique

L La longueur de la grille

Z La largeur de la grille

Cependant, pour aboutir à la relation liant l'induction électrique du ferroélectrique (Sel de Rochelle) du transistor, en fonction de la température, il suffit d'injecter la relation de l'équation (1.13) dans l'équation (3.10)

$$U_{DS} = \frac{T_{ox} \cdot L \cdot S}{\mu^* \varepsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z} (A + 3BD^2) \frac{dD}{dt} \quad (3.11)$$

Puisque dans la configuration de la FeRAM, le transistor est relié en parallèle avec la résistance [26], l'équation (3.11), prend la forme suivante:

$$\begin{aligned} U_{DS} &= \frac{T_{ox} \cdot L \cdot S}{\mu^* \varepsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z} (A + 3BD^2) \frac{dD}{dt} \\ U_{DS} &= \frac{q}{C} = U_0 e^{(i\omega t)} \end{aligned} \quad (3.12)$$

A partir de l'équation (3.12), on obtient la relation de l'induction électrique de l'oxyde de grille en fonction de la température, comme suit:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\mu^* \varepsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z \cdot U_0 e^{(i\omega t)}}{T_{ox} \cdot L \cdot S} (A + 3BD^2)^{-1} \quad (3.13)$$

$$\mu^* = 675 \text{Cm}^2/\text{V/s}$$

$$U_{GS} - U_{Th} = 4\text{V}$$

Avec $Z = 3.10^6 \text{m}$

$$T_{ox} = 40.10^{-9} \text{m}$$

$$L = 2.10^{-6} \text{m}$$

D'après l'équation(3.13), la variation temporelle de l'induction électrique au niveau du transistor en fonction de la température est non linéaire, ceci implique donc une non linéarité du circuit électronique. Cette équation à la forme d'une équation différentielle ordinaire, et peut cependant, être résolue numériquement.

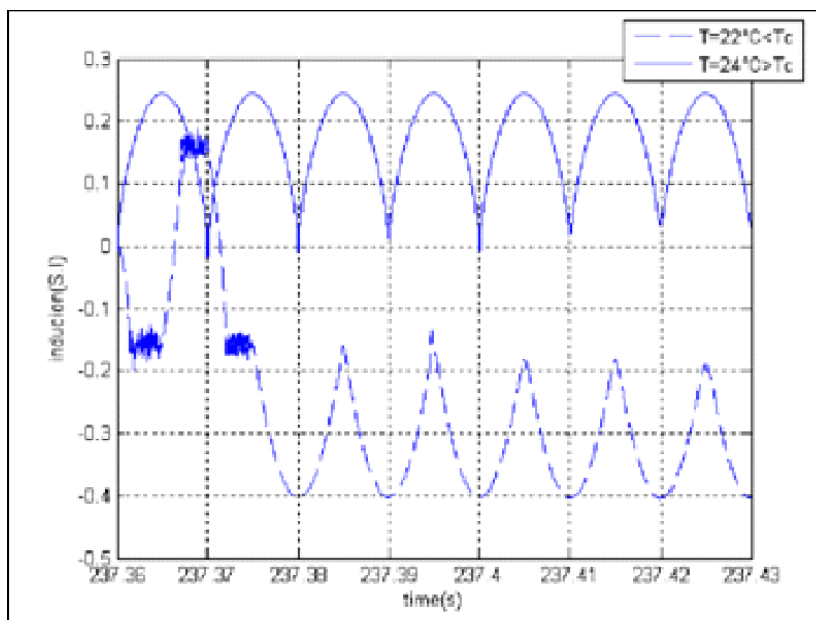


Figure3.3: Variation temporelle de l'induction électrique pour $T < T_c$ et $T > T_c$

D'après la figure(3.3), il est clair que la température de transition de phase est une grandeur physique très importante pour la fiabilité de la FeRAM, car son changement provoque un problème de principe d'écriture et de lecture de la FeRAM. Le fait que l'induction électrique change de valeur(elle passe d'une valeur négative pour $T < T_c$, à une valeur positive pour $T > T_c$), ceci veut dire qu'il y'a un changement de polarisation des moments dipolaires, et il faudra revoir l'étape de la programmation de la FeRAM.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une analyse numérique de l'influence de la température du Sel de Rochelle, avec le quel on a construit les FeCAP et FeFET sur le mode de fiabilité des FeRAM.

Cette étude nous a permis de bien comprendre que la température de transition de phase de Landau limite les performances de la mémoire ferroélectrique; Au dessous de la température de transition, l'induction possède une certaine valeur maximale, sur laquelle on doit compter pour construire le cycle d'hystérésis, et par la suite on peut programmer la mémoire. Au dessus de la température de transition de phase cette valeur de polarisation change, a ce moment le principe d'écriture /lecture des données binaires "1", "0" doit être vérifié.

Dans la prochaine section de cette thèse, nous allons élargir notre étude, on changeant de matériau ferroélectrique, ayant une très forte constante diélectrique, nous présenterons par la suite les mécanismes de défaillance de la FeRAM

QUATRIEME CHAPITRE

**Effet de la température
du BST sur les FeRAM**

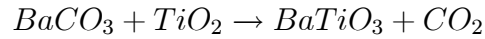
Chapitre 4

Effet de la température du BST sur les FeRAM

4.1 Introduction

Les nouveaux appareillages électroniques utilisent des signaux de plus en plus rapides. Alors, si on souhaite encore réduire la taille des condensateurs en augmentant leur efficacité, il est indispensable de trouver des matériaux avec des constantes diélectriques ϵ plus importantes. Ces matériaux ont été tout d'abord l'oxyde de zirconium ZrO_2 , puis l'oxyde d'Yttrium Y_2O_3 et de titane TiO_2 . Mais la présence de constantes diélectriques relatives énormes- de l'ordre de plusieurs milliers de valeurs- dans certains ferroélectriques les ont concurrencés et c'est ainsi que le titanate de baryum $BaTiO_3$ est devenu la référence[34]. Ce matériau, en massif, a un pic de constante diélectrique relative (>8000) autour de sa température de transition de phase appelé aussi température de Curie. Celle-ci est d'environ 120° .

Les propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectrique du $BaTiO_3$, le rende meilleur matériau utilisé dans la construction des composants électroniques. Il est obtenu par la réaction chimique suivante:



La polarisation du matériau BaTiO_3 est en grande partie ionique. Elle est due à la somme des polarisations internes des dipôles contenus dans chacune de ses mailles. L'ensemble des mailles possédant la même polarisation est appelé domaine. Ce matériau ferroélectrique possède plusieurs domaines pouvant être de polarisation différente voir opposée et être séparés par des parois de domaines. Cette structure sous forme de domaines n'est pas encore tout à fait comprise mais reste une constante pour tous les matériaux ferroélectriques. Elle est représentée sur la figure suivante

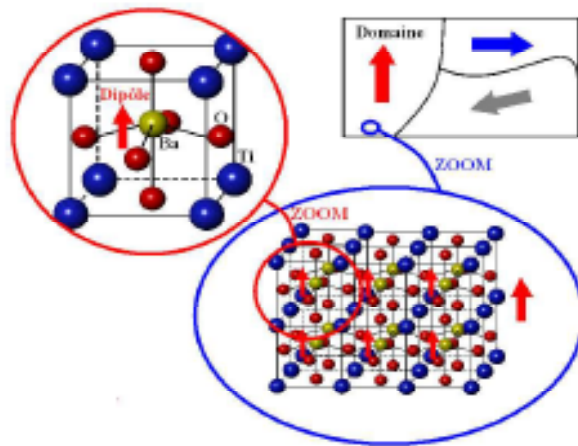


Figure4.1: Représentation de la structure du BaTiO_3

Ce caractère ferroélectrique varie suivant la tension appliquée mais aussi avec la température et surtout, autour de sa température de Curie T_c . Si le BaTiO_3 est chauffé au dessus de sa température de Curie, sa structure cristalline passe à l'état paraélectrique, comme montré sur la figure suivante[35]:

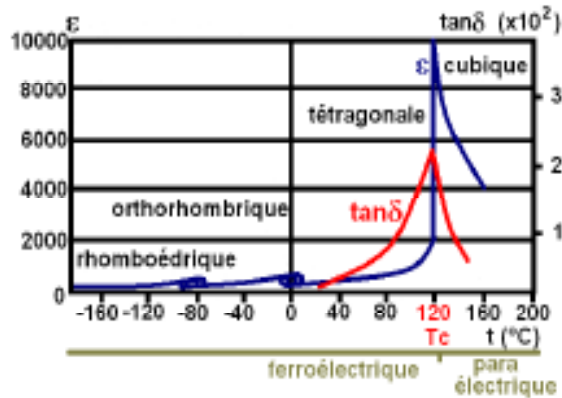


Figure4.2: Évolution de la structure du $BaTiO_3$ et ses propriétés diélectriques avec la température

L'intérêt du $BaTiO_3$ est indéniable, mais malheureusement sa température de transition est de $120^\circ C$, ce qui est trop élevé pour l'application de composants électroniques. La solution proposée est le dopage en Etain(Sn) du $BaTiO_3$ ce qui permet d'abaisser cette température de transition dans des gammes de $120^\circ C$ à $-200^\circ C$. Il est donc possible de trouver une composition de $BSTO$ idéale pour chaque température d'étude souhaitée.

Outre l'importance constante diélectrique autour de sa température de transition, celle-ci varie en fonction de la tension appliquée. Pour les applications nécessitant un maximum de variation de cette constante en fonction de la tension, il est préférable d'utiliser une composition de $BSTO$ telle que la température de transition soit au plus proche de la température de fonctionnement souhaitée [34].

Pour la réalisation de $FeRAM$ contrôlées en température, il est nécessaire de se libérer des problèmes d'instabilité diélectrique à la température de transition ou de la polarisation rémanente dans le domaine ferroélectrique. Il est donc préférable de travailler dans la gamme de températures comprises entre 5 et $15^\circ C$ au dessus de la température de Curie.

4.2 Contribution à l'effet de la température de transition du BST sur le fonctionnement d'une FeRAM

Théoriquement, on suppose que la température de Curie du $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$ (BST) est abaissée lorsque les ions actifs Ti^{4+} sont remplacés par les ions non actifs de Sn^{4+} ou Zn^{4+} [36].

Alors une nouvelle méthode (réaction état-solide à basse température), proposé par Shi-Wen et all [30] sera exploitée pour synthétiser le $BaTiO_3$. Cette réaction à l'avantage d'être non polluante.

Donc le nouveau matériau $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$, obtenu par la réaction état-solide à basse température, montre d'excellentes propriétés diélectriques, elle n'augmente pas seulement la valeur de la constante diélectrique, mais réduit aussi les pertes diélectriques, le plus important, c'est qu'elle ramène la température de transition de phase à $23,5^{\circ}C$, sans changer les coefficients de Landau[37], comme le montre la figure suivante:

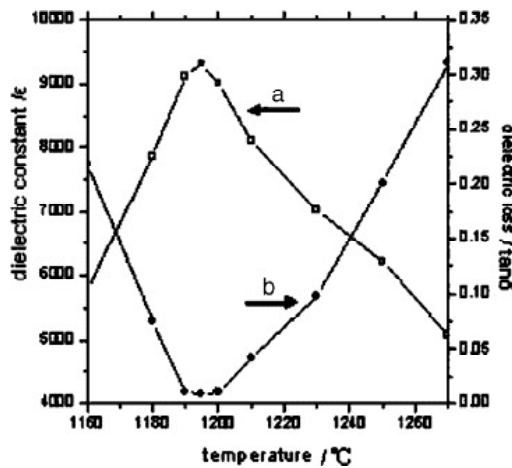


Figure 4.3: Propriétés diélectriques en fonction de la température de transition (a) $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$, (b) $BaTiO_3$

4.3 Hypothèse de base du BTS

On s'appuyant sur la théorie phénoménologique de transition de phase de Landau, on peut dire que l'énergie libre du $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$ peut se développer en fonction de l'induction électrique sous la forme suivante [38]:

$$G = (\alpha_1 + \beta_3) D_3^2 + (\alpha_{11} + \beta_{33}) D_3^4 \quad (4.1)$$

où

$$\alpha_1 = \alpha_0(T - T_c), \alpha_0 = \frac{1}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot C}$$

Avec

C : constante de Curie-Weiss

$\alpha_0, \beta_3, \alpha_{11}, \beta_{33}$, représentent les coefficients de Landau.

G représente l'énergie libre du matériau $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$

D représente l'induction électrique

Et puisque le champ électrique dans les milieux matériaux vérifie la relation de l'équation (1.9), on a donc la relation suivante:

$$E = (\alpha_1 + \beta_3) D_3 + (\alpha_{11} + \beta_{33}) D_3^3 \quad (4.2)$$

Avec

$$\alpha_0 = 0.041 \cdot 10^7 Nm^6/C^4$$

$$\alpha_{11} = 12.65 \cdot 10^7 Nm^6/C^4$$

$$\beta_{33} = 4.8 \cdot 10^8 Nm^6/C^4$$

$$\beta_3 = 1.92 \cdot 10^{12} Nm^6/C^4$$

$$C = 10^5 S.I$$

La relation (1.6), caractérisant le matériau à la transition de phase, peut également décrire les positions d'équilibres.

L'énergie libre du diélectrique possède les extremums suivants

1)- G présente un minimum, lorsque $T > T_c$, pour $D = 0$

- 2)-G présente deux minima, lorsque $T < T_c$, pour $D = \pm \sqrt{\frac{\alpha_1 + \beta_3}{\alpha_{11} + \beta_{33}}}$
 3)-G représente un maximum, lorsque $T < T_c$, pour $D = 0$

On passe continûment de l'état le moins symétrique à l'état le plus symétrique.

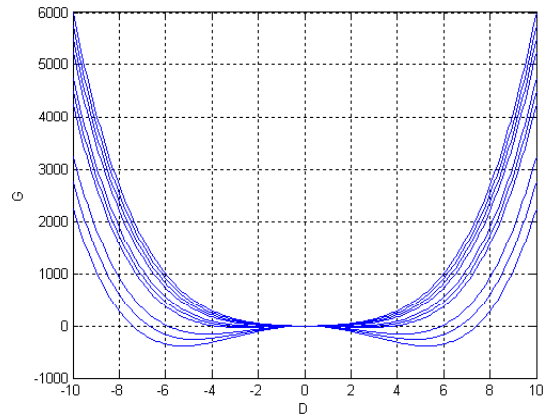


Figure4.3: L'énergie libre du diélectrique pour différentes températures

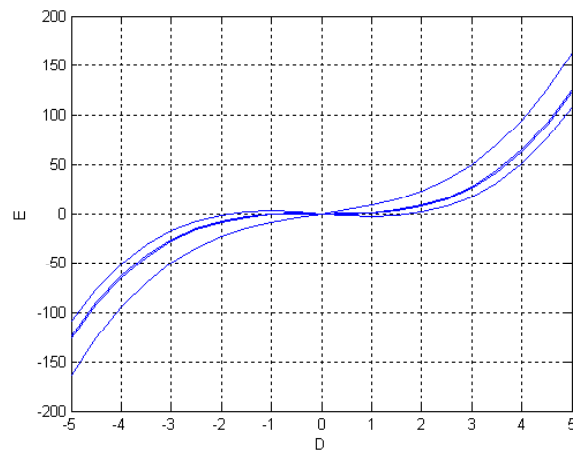


Figure4.4: champ électrique pour différentes températures

4.4 Capacité du FeCAP construit par le BST

L'injection de la relation (4.1) dans l'équation (1.13), nous permet d'obtenir la relation suivante:

$$\varepsilon^{-1} = 2(\alpha_1 + \beta_3) + 12(\alpha_{11} + \beta_{33}) D_3^2 \quad (4.3)$$

Donc l'équation (4.3), représente la loi de la variation de la permittivité diélectrique en fonction de la température.

En s'appuyant sur le modèle de la FeRAM (figure 2.1), et les équations (3.4) et (3.11), on obtient les relations suivantes:

$$C = \frac{S}{e(2(\alpha_0(T - T_c) + \beta_3) + 12(\alpha_{11} + \beta_{33}) D_3^2)} \quad (4.4)$$

La combinaison de l'équation (3.5) et (4.4), nous permet de trouver la relation entre l'induction électrique du matériau BST et la température, d'où:

$$\frac{dD}{dt} + \frac{eA}{RS} D + \frac{eb}{RS} D^3 = \frac{U}{RS} e^{(i\omega t)} \quad (4.5)$$

avec

$$\begin{aligned} A &= 2(\alpha_0(T - T_c) + \beta_3) \\ b &= 12(\alpha_{11} + \beta_{33}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

La relation (4.5) donne la variation de l'induction électrique du FeCAP, et on peut la représenter par la figure suivante:

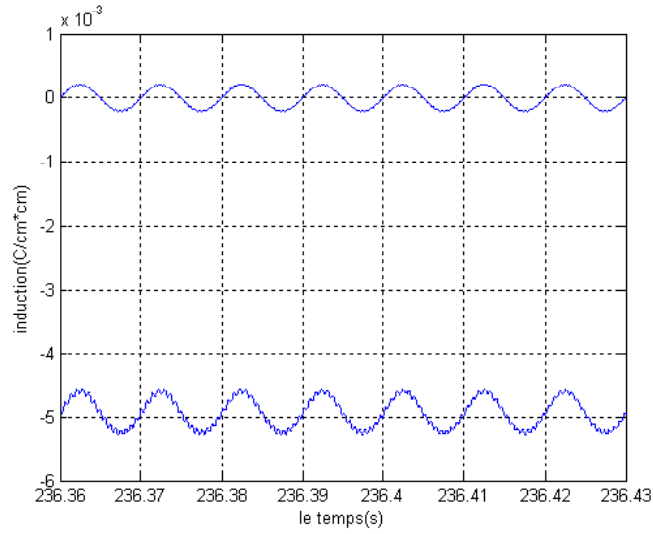


Figure4.5: Variation de la capacité du FeCAP
en fonction de la température

4.5 Réponse du FeFET fabriqué par le BST

L'injection de l'équation (4.3) dans l'équation (3.11), nous permet de trouver la variation de l'induction électrique du FeFET en fonction de la température

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\mu^* \varepsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z \cdot U_0 e^{i\omega t}}{T_{ox} \cdot L \cdot S [2(\alpha_0 (T - T_c) + \beta_3) + 12(\alpha_{11} + \beta_{33}) D^2]} \quad (4.7)$$

La relation (4.7), peut être représentée par la figure ci dessous:

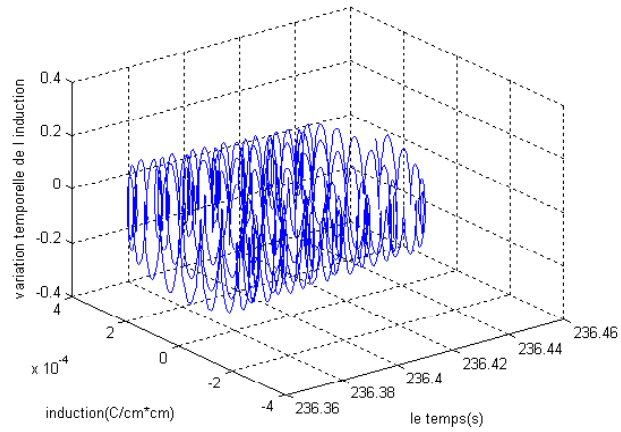


Figure4.6: Variation de l'induction électrique du FeFET pour $T < T_c$

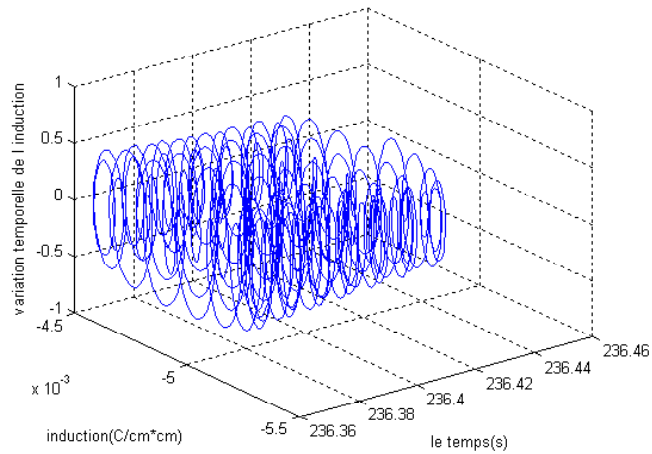


Figure4.7: Variation de l'induction électrique du FeFET pour $T > T_c$

D'après les équation trouvées (4.4) et (4.5), il est clair que l'introduction du ferroélectrique BST dans la fabrication des FeRAM produit une non-linéarité du circuit d'où la défaillance de la FeRAM.

D'après les deux figures (4.6) et (4.7), on constate qu'il y a bon accord avec la théorie de Landau, du fait que D oscille autour de zéros pour $T = 25^\circ C > T_c$, et autour d'une valeur non nulle pour $T = 22^\circ C < T_c$.

4.6 Réponse de la FeRAM au champ électrique appliqué

En utilisant l'équation (4.5), nous pouvons aussi voir que le comportement de l'induction électrique du ferroélectrique BST est influencé par le champ électrique appliqué.

On trace la variation de l'induction électrique de la FeRAM dans la phase ferroélectrique ($T < T_c$), pour différentes valeurs de la tension appliquée

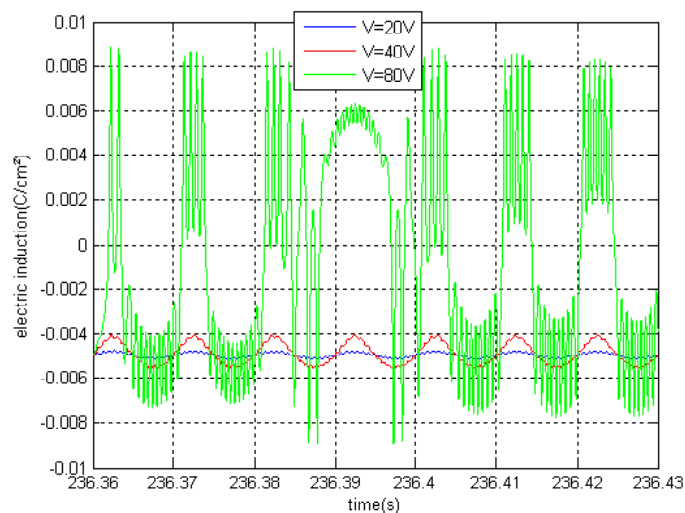


Figure 4.7: Dépendance temporelle de l'induction pour $T = 23.5^\circ C$, pour des valeurs croissantes de la tension excitatrice.

A cette température voisine, on fait varier la tension d'alimentation.

Pour des petites perturbations $U=20V$; et $U=40V$, comme on le voit sur la figure 4.7,

le système est périodique, donc rien de particulier. Quand $U=80V$, les choses sont plus compliquées. Comme on le voit, il n'y a plus de période du tout; le système a pris un comportement *chaotique* avec un conflit entre la période excitatrice et la période de la résonance.

Mais si on observe bien la figure, on remarque que ce comportement n'est pas vraiment chaotique au sens propre du mot. Car on peut voir qu'il a une certaine allure, et c'est ce qui est appelé: *le chaos déterministe*.

4.7 Mécanismes de Défaillance de la FeRAM

En réponse à différentes sollicitations externes telles que l'application d'une tension continue, ou même la simple influence du temps, les propriétés électriques d'un condensateur ferroélectrique évoluent en fonction du type de matériau le constituant. Deux grands modes de défaillance sont associés à la technologie FeRAM (Kington & Streiffer,[39] ; Scott,[40]; Waser,[41]) : la fatigue, limprint. Les prochains paragraphes présentent succinctement ces différents modes de défaillance et décrivent les phénomènes physiques qui en sont à l'origine.

4.7.1 Fatigue

La fatigue (correspondant à l'endurance dans les dispositifs) est définie comme la réduction de polarisation de switching en réponse au cyclage électrique. Ce mode de défaillance est très dommageable dans les mémoires car il pose un problème de lecture de l'information. En effet, si la diminution de polarisation devient trop importante, il est impossible de distinguer les courants de switching ($j1$) et de non switching ($j0$) décrits dans le chapitre 2. Ainsi, des erreurs de lecture apparaissent et altèrent la fiabilité de la mémoire. Typiquement, dans les mémoires FeRAM, le nombre de cycle d'écriture/lecture supporté par le condensateur ferroélectrique sans perte significative de polarisation devrait être de 10^{15} cycles. Cette caractéristique varie beaucoup d'un matériau à l'autre.

Par exemple, les matériaux PZT présentent une moins bonne résistance intrinsèque à la fatigue que BST (Paz de Araujo et al.,[42]; Park et al.,[43]) ou BLT (Park et al.,[44]). Cependant, des optimisations dans les étapes d'élaboration peuvent permettre de pallier en partie ce problème (Kim & Song,[45]).

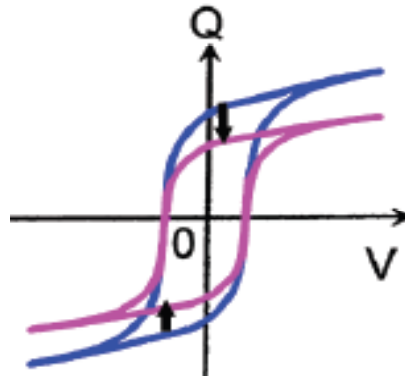


Figure4.8: la forme du cycle d'hystérésis(Q,V)
(en bleu: état initial; en rose: après cyclage)

4.7.2 Formation d'une couche passive

Le fait d'appliquer aux bornes du matériau ferroélectrique une tension alternative peut conduire à la formation et à la croissance d'une couche passive aux interfaces avec les électrodes. La présence de cette couche modifie le caractère ferroélectrique du matériau en diminuant la polarisation. D'autre part, d'après les modèles de Tagantsev et al. (Tagantsev et al.,[46]) et Robels et al. (Robels et al.,[47]), ce mécanisme doit être accompagné d'une inclinaison "tilt" du cycle d'hystérésis sans toutefois modifier le champ coercitif.

4.7.3 Imprint

Le phénomène d'imprint caractérise la tendance d'un matériau ferroélectrique à favoriser, sous certaines conditions, un état de polarisation préférentiel. En effet, comme le montre la Figure suivante, l'application d'une tension positive (continue ou pulsée) conduit à favoriser l'état de polarisation rémanent positif et induit un déplacement du cycle d'hys-

térésis vers les tensions négatives. Le phénomène est strictement opposé dans le cas où la tension appliquée est négative. Toutefois, il faut noter que les conditions d'élaboration d'un matériau peuvent être à l'origine du phénomène d'imprint sans application d'un champ électrique externe. Dans les mémoires, l'apparition de ce phénomène entraîne deux types de défaillance (Grossman et al.,[48]; Waser,[41]):

(i) Le déplacement global du cycle d'hystérésis induit une dissymétrie dans la réponse électrique du matériau, la valeur absolue de l'un des champs coercitifs étant considérablement augmentée. Si la tension utilisée pour l'écriture de l'information n'est pas assez importante, i.e. ne dépasse pas la valeur de cette nouvelle tension coercitive, il est impossible d'écrire une donnée: c'est la défaillance en écriture.

(ii) Le déplacement latéral du cycle d'hystérésis donne également lieu à une diminution drastique de l'une des deux polarisations rémanentes (P_{r-} dans la figure suivante). Ceci entraîne une diminution de l'écart entre les polarisations de switching et de non-switching du matériau. Il devient donc rapidement impossible de discriminer les deux états de polarisations et donc de lire la donnée inscrite: c'est la défaillance en lecture.

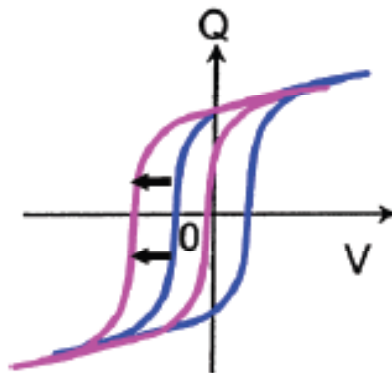


Figure4.9:Evolution du cycle d'hystérésis $Q(V)$
(en bleu avant imprint; en rouge: après imprint)

CONCLUSION GENERALE

4.8 Conclusion Générale

Dans cette thèse, nous avons présenté une étude théorique de l'effet de la température de transition de phase sur le comportement dynamique de la mémoires FeRAM. Les principaux résultats de notre travail sont les suivants:

1)_ L'étude faite sur le condensateur ferroélectrique contenant le Sel de Rochelle, nous a permis de conclure les remarques suivantes:

-L'introduction de ce type de matériau, permet d'élever la capacité des condensateurs près de T_c (température de transition de phase), pour sa forte constante diélectrique.

-Le matériau ferroélectrique produit une non-linéarité du circuit électronique, d'où l'urgente nécessité de trouver une méthode numérique, afin de résoudre le problème, car la résolution analytique ne répond pas à ce type de problème.

-La polarisation électrique à lieu en deça de la température de transition de phase. C'est exactement à cette phase que le condensateur accumule les charges. Au delà de la température de transition de phase la polarisation disparaît et le condensateur perd son énergie emmagasinée. Donc la FeRAM perd de son efficacité

2)_ La contribution à l'étude de l'effet de la température sur le mode de fonctionnement de la FeRAM, et la simulation numérique, nous ont permis de conclure que:

-Les FeFET et les FeCAP ont donc, avec leurs faibles pertes, leurs fréquences de fonctionnement allant jusqu'à 100GHz, un grand intérêt pour les technologies modernes, nécessitant l'enregistrement de l'information, malheureusement leur coût de fabrication reste assez élevé.

-La théorie de transition de phase appliquée au niveau de la FeRAM, ainsi que la simulation numérique, ont montrés l'existence de deux phases, la phase ferroélectrique dans laquelle la FeRAM est programmable, fiable et peut fonctionner correctement, puisque le condensateur FeCAP accumule la charge et le transistor fonctionne correctement, ainsi les états logiques '0' et '1' du codage binaire correspondant respectivement aux deux états de polarisation rémanente P_{r+} et P_{r-} , confèrent à la mémoire FeRAM son caractère non volatile. Et dans la phase paraélectrique, la polarisation disparue, à ce moment on ne

pas écrire/lire l'information de la FeRAM, elle perd son caractère de non volatilité, le condensateur perd toute son énergie emmagasinée, et le transistor subit un comportement étrange et chaotique.

Enfin, le travail entrepris dans le cadre de cette thèse a ouvert une direction vers la recherche qui mérite à notre avis, d'être approfondie, sur:

-La nécessité de trouver des matériaux céramiques intégrables dans la FeRAM, utilisables dans les deux phases (para-ferroélectrique, et encore pouvoir les déposer sous forme de couches minces($< \mu m$))

-Trouver d'autres techniques non polluante, non coûteuse, afin d'abaisser la température de transition de phase au tour de la température ambiante, pour le bon fonctionnement de la FeRAM.

-Du point de vue de la fiabilité de la mémoire, il faut compléter les études électriques des structures de test par des expériences sur composants. Ces tests permettraient d'estimer la robustesse de la technologie sous différentes sollicitations(cyclage, humidité, champ électrique)

Bibliographie

- [1] **Juliano Brahim Razfindramora** “Modélisation et Caractérisation de Transistors MOS appliquées à l’étude de la programmation et du vieillissement de l’oxyde tunnel des mémoires EEPROM”, thèse de doctorat de l’université de Provence(2004).
- [2] **Moira Hocevar** “Croissance et caractérisation électrique de nanocristaux d’InAs/SiO₂ pour des applications de mémoires non volatiles sur silicium”, thèse de doctorat de l’institut national des sciences appliquées de Lyon(2006).
- [3] **J.F. Scott, C.A. Araujo**, Science 246 (1989) 1400.
- [4] **C.A. Paz De Araujo, J.D. Cuchiaro, L.D. McMillan, M.C. Scott, J.F. Scott**, Nature 374 (1995) 627.
- [5] **J.F. Scott**, Ferroelectric Memories, Springer, Heidelberg, Germany, 2000.
- [6] **E.Tokumitsu, R.I. Nakamura, H.Ishiwara**, IEEE Electron. Device Lett. 18 (1997) 160.
- [7] **K. Sugibuchi, Y. Kurogi, N. Endo**, J. Appl. Phys. 46 (1975) 2877.
- [8] **S.Y. Chen, C.L.Sun, S.B.Chen, A. Chin**, Appl. Phys. Lett. 80 (2002) 3168.
- [9] **J. Wang, J.B. Neaton, H. Zheng, V. Nagarajan, S.B. Ogale, B. Liu, D. Viehland, V. Vaithyanathan, D.G. Schlom, U.V. Waghmare, N.A. Spaldin, K.M. Rabe, M. Wuttig, R. Ramesh**, Science 299 (2003) 1719.

- [10] **Z.Wen, G. Hu, S. Fan, C. Yang, W. Wu, Y. Zhou, X. Chen, S. Cui**, Thin Solid Films 517 (2009) 4497.
- [11] **Y.W. Chiang, J.M. Wu**, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 142103.
- [12] **P.C. Juan, C.H. Wang**, Microelectron. Eng. 86 (2009) 1845.
- [13] **Chia-Liang Sun, Trevor Pi-Chun Juan, Yu-Wei Hsu , Yu-Wei Liu (2010)** "Effect of processing temperature on characteristics of metal-ferroelectric(BiFeO₃)-insulator (HfLaO)-silicon capacitors", Thin Solid Films, Volume 518, Issue 24, 1 October 2010, Pages 7433-7436.
- [14] thèsebody
- [15] **Philippe Depondt**, "Physique numérique", chapitre III, Condensateur non linéaire et modèle de Landau, page 141, Eds Vuibert.
- [16] **Dan Ricinschi, Catalin Harnagea, Constantin Papusoi, Liliana Mitoseriu, Vasile Tura and masanori Okuyama**, "Analysis of Ferroelectric switching in finite media as a Landau-type phase transition", J.Phys.Condens Matter 10(1998) 477-492
- [17] **M.Ourrad, T.Bouaz, A.Cheknane** " Study and Analysis of Transitions in Rochelle Salt", International Review of Physic(IREPHY) , December 2007, pp350.
- [18] **N.Nicolas Menou**, "Technologie FeRAM: fiabilité et mécanisme de défaillance de condensateurs ferroélectriques élémentaires et intégrés", thèse de doctorat de l'université de Sud Toulon -Var(2004).
- [19] **E. Harari, L. Schmitz, B. Troutman, S. Wang**, Non-Volatile Static RAM, IEEE ISSCC Dig. Tech. Pap., pp.108,1978.
- [20] **FREESCALE**: A 0.18 m 4Mb Toggling MRAM. disponible sur :<http://www.freescale.com/les/memory/doc/>.

- [21] **C. De Graaf et al.**, A novel high-density low cost diode programmable read only memory, in proc.IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) 1996, pp.189.
- [22] **W. D. Brown, J.E. Brewer**, NonVolatile semiconductor Memory Technology, IEEE PRESS, New York, 1998.
- [23] **H.E. Maes, G. Groeseneken, H. Lebon, J. Witters**, Trends in semiconductor memories, Microelectr. J., vol. 20, pp. 9, 1989
- [24] **A.R.Das, P.Bhattacharaya, W.Perez, R.S.Katiyar**, Appl.phys.Lett.81(2002)4052.
- [25] **Tybell.T, Ahn, C.H., Triscone, J.M.**, Appl. Phys. Lett. 75(6) (1999), 856
- [26] **Tiedke, S., Schmitz, T., Prume, K., Roelofs, A., Schneller, T., Kall, U., Waser, R., Ganpule, C.S., Nagarajan, V., Stanishevsky, A. & Ramesh, R.**, Appl. Phys. Lett. 79 (2001), 3678.
- [27] **Junquera, J. & Ghosez, Ph.**, Nature 422 (2003) 506.
- [28] **Scott, J.F. & Pouligny, B.**, J. Appl. Phys. 64 (1988) 1547.
- [29] **M.ourrad,T.Benouaz**, The Temperature Effect on The Operating Mode of FeRAM, International Journal of Nonlinear Science, Vol.13(2012) No.3,pp.267-272
- [30] **J.P.Colinge, F.Van De Wiele**, Physique des dispositifs semiconducteurs, De Boeck (1996)
- [31] **T.Skotnicki**, transistor Mos et sa technologie de fabrication, Techniques de l'ingénieur, E2430(2000)
- [32] **C.Ngô, H.Ngô**, les semiconducteurs de l'électron aux dispositifs, Dunod(2003)
- [33] **H.Mathieu**, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, Dunod DL(2004)

- [34] **San Su Kim, Won-Jeong Kim**, Ferroelectric Properties of Randomly Oriented $Bi_{1-x}Pr_xTi_3O_{12}$ thin films fabricated by a sol-gel method, *Thin Solid Films* 484(2005)303-309
- [35] **Thierry Delage**, Optimisation du dépôt de films minces de BSTO et de tris couches YBCO/BSTO/YBCO; phénomène de croissance et d'interfaces, application à la réalisation de composants hyperfréquences accordables, Thèse de Doctorat(2003),université de LIMOGES
- [36] **H.Kohlstedt, Y.Mustafa, A.Gerber, A.Petraru, M.Fitsilis, R.Meyer, U.Böttger, R.Waser**, Current status and challenges of ferroelectric memory devices, *Microelectronic Engineering* 80(2005) 296-304
- [37] **Shi-Wen Ding, Jia Chai, Chun Yan Feng**, Low temperature synthesis and dielectric properties of $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$, *Materials Letters* 60(2006)3241-3244
- [38] **K.J.Choi, M.Biegalski, Y.L.Li, A.Sharan, J.S.chubert, R.Uecker, P.Reiche, Y.B.Chen, X.Q.Pan, V.Gopalan, L.Q.Chen, D.G.Schlom, C.B.Eom**, Enhancement of ferroelectricity in strained $BaTiO_3$ thin Films.
- [39] **Park, B.H., Kang, B.S., Bu, S.D., Noh, T.W., Lee, J. & Jo, W.**, *Nature* 401 (1999) 682.
- [40] **Park, B.H., Kang, B.S., Bu, S.D., Noh, T.W., Lee, J., Kim, H.D. & Kim, T.H., J. Korean Phys. Soc.** 35 (1999) 1306.
- [41] **Tagantsev, A.K., Landivar, M., Colla, E. & Setter, N.**, *J. Appl. Phys.* 78(4) (1995) 2623.
- [42] **Roelofs, A., Böttger, U., Waser, R., Schlaphof, F., Trogisch, S & Eng, L. M.**, *Appl. Phys. Lett.* 77(21) (2000) 3444..
- [43] **Waser, R.**, *Nanoelectronics and Information Technology*, Edition Winley-VCH, Weinheim (2003).

- [44] Paz de Araujo, C.A., Cuchiario, J.D., McMillan, L.D., Scott, M.C. & Scott, J.F., Nature 374 (1995) 627.
- [45] Park, B.H., Kang, B.S., Bu, S.D., Noh, T.W., Lee, J., Kim, H.D. & Kim, T.H., J. Korean Phys. Soc. 35 (1999) 1306.
- [46] Park, B.H., Kang, B.S., Bu, S.D., Noh, T.W., Lee, J. & Jo, W., Nature 401 (1999) 682.
- [47] Robels, U., Calderwood, J.H. & Arlt, G., J. Appl. Phys. 77 (1995) 4002.
- [48] Grossmann, M., Lohse, O., Bolten, D., Boettger, U., Schneller, T. & Waser, R., J. Appl. Phys. 92(5) (2002) 2680.

The Temperature Effect on the Operating Mode of FeRAM

M. Ourrad *, T. Benouaz

Laboratory of Electronic Physics and Modeling, University Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen, Algeria

(Received 24 May 2011 , accepted 10 October 2011)

Abstract: In this paper, we present the study of Landau's phase. phase transition in the medium dielectric which the FeRAM is working. The existence of two phase (parra-ferroelectric) can be able to explain the phenomenon of reading / writing in the FeRAM.

Keywords: Dielectric; ferroelectric capacitor; FeRam; Landau theory of phase transition

1 Introduction

Ferroelectric random access memories have attracted much attention because of the lower writing voltage and faster switching speed than those of Flash memory [1],[2]. Recently ferroelectric memory field effect transistors (FEMFETs) with a metal-ferroelectric - insulator-silicon (MFIS) gate structure have emerged as promising non volatile memory devices [3]. The superior characteristics of FEMFETs include a single-device structure, small size, low power consumption, and non-destructive readout operation [4]. The purpose of the insulator layer in MFIS structure is to prevent the reaction and inter-diffusion between the ferroelectric layer and silicon substrate that greatly degrades the device characteristics [5],[6]. The low leakage current and good interface property can be expected to be achieved after the insulating material is inserted as a buffer layer. Recently, $BiFeO_3$ has attracted great attention for its multi-ferroic properties including dielectric and coupled ferroelectric and magnetic ordering [7],[8]. Furthermore, low crystallization temperature and large remnant polarization (P_r) of $BiFeO_3$ (BFO) are suitable for non volatile memories in comparison with other ferroelectric materials. The characteristics of the MFIS structures with ferroelectric BFO thin films and ZrO_2 , $Ba(Sr,Ti)O_3$, Y_2O_3 , and HfO_2 insulating buffer layer on silicon substrates have been reported in these years [9],[10],[11]. In this paper, we study the temperature influence on the behavior of the FeRAM, so we rely on the theory of phase transition, it was used in previous work by Ourrad et al. [2007] and Benouaz et al [2010] see [12],[13]. The material chosen in our study is the Rochelle salt ferroelectric, of chemical formula $CO_2K - 2CHOH - CO_2Na, 4H_2O$ which changes phase at the critical temperature $T_c = 23.5^\circ C$ [14].

2 Characterization of FeRAM

2.1 Configuration of FeRAM

The Fig.1 shows a schematic drawing of the FeRAM structure [15].

The unit cell was formed by one transistor and one ferroelectric capacitor which were connected in parallel, during the operation, one capacitor was selected randomly by cutting off its pare transistor.

Controlling the voltage across the capacitor is provided by three conductive lines called "bit line", "word line", "plate line".

2.2 Basic hypothesis of dielectric material

The free energy of a dielectric material may be developing as a function of polarization by [16]:

*Corresponding author. E-mail address: t.benouaz@mail.univ-tlemcen.dz

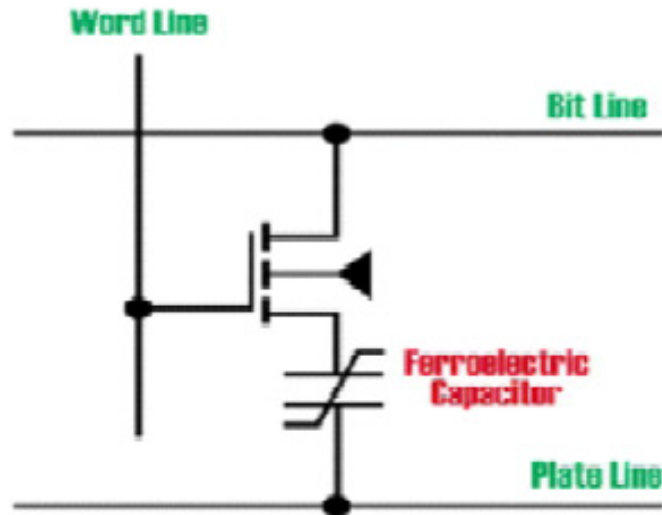


Figure 1: Standard structure 1T/1C, (1 transistor (T) for 1 capacitor (C))

$$G(D, T, E) = \frac{A}{2}D^2 + \frac{B}{4}D^4 \quad (1)$$

According to the thermodynamics of dielectrics, we have the following relations [17]

$$E = \left(\frac{dG}{dD} \right) \quad (2)$$

So,

$$E = AD + BD^3 \quad (3)$$

On the other hand, the dielectric permittivity expressing the property of the material to oppose the passage of electric current, is given by equation (4)

$$\varepsilon = \frac{dD}{dE} \quad (4)$$

From equations (3) and (4), we obtain the relation (5) which connects the dielectric permittivity ε to the displacement macroscopic of dipole moment \vec{D} , the form of equation (5) is as follows

$$\frac{1}{\varepsilon} = A + 3BD^2 \quad (5)$$

The variation of dielectric permittivity versus electric induction and temperature is nonlinear, and is given by relationship (6)

$$\varepsilon^{-1} = A_0(T - T_c) + 3BD^2 \quad (6)$$

2.3 Modelling FeRam

FeRAM memory chosen in our study is the combination 1T/1C, and to increase performance of non-volatility, we must control the behavior of the capacitor and transistor constituting the memory, for this study we propose two mathematical models, the first represented the behaviour of the ferroelectric capacitor and the second will be for the behavior of the transistor.

2.4 Modeling ferroelectric capacitor

To increase the capacitance, we propose to introduce a ferroelectric material (Rochelle salt) between the anode and the cathode of capacitor [18], its capacity takes the form of equation (7):

$$C = \frac{\varepsilon S}{e} \tag{7}$$

With $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

Applying a voltage on the FeRAM leads to the reorientation of dipole moments according to the relation (8), [19]

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon E \tag{8}$$

With $Q = D.S$

By injecting equation (5) into (7), we obtain

$$C = \frac{S}{e(A_0(T - T_c + 3BD^2))} \tag{9}$$

It can be seen in equation (9); the ability of the ferroelectric capacitor varies in a non-linear with temperature and electric induction.

And to assess the behavior of the ferroelectric capacitor, we can connect it in series with a resistance, the application of Kirchhoff's laws yields the relation (10)

$$RI + \frac{Q}{C} = Ue^{i\omega t} \tag{10}$$

With $I = \frac{dQ}{dt} = Q \cdot$

Then equation (10) takes the following form

$$D \cdot + \frac{eA}{RS}D + \frac{eB}{RS}D^3 = \frac{U}{R.S}e^{i\omega t} \tag{11}$$

2.5 Modeling the transistor

The transistor chosen for our study is MOSFET type (Metal, Oxide, Semi-conductor field effect). The miniaturization of its thickness leads to the birth of a leakage current by tunneling effect; to remedy to this problem, we consider in this work to replace the grid oxide by the ferroelectric material "Rochelle Salt" of higher dielectric permittivity, to have a larger physical thickness for equivalent capacity.

The voltage of the transistor takes the following form equation (12)

$$D_{DS} = \frac{I_{DS} \cdot T_{ox} \cdot L}{\mu^* \varepsilon \varepsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z} \tag{12}$$

With $I_{DS} = \frac{dq}{dt}$

The injection of equation (5) in equation (12) yields equation

$$U_{DS} = \frac{T_{ox} \cdot L \cdot S}{\mu^* \varepsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z} (A + 3BD^2) \frac{dD}{dt} \tag{13}$$

From equation (13), we find that the temporal variation of the induction is nonlinear and because in our circuit the capacitor is connected in parallel with transistor, then we can deduce the relation (14)

$$U_{DS} = \frac{T_{ox} \cdot L \cdot S}{\mu^* \varepsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z} (A + 3BD^2) \frac{dD}{dt} = \frac{q}{C} = U_0 e^{i\omega t} \tag{14}$$

From equation(14), we obtain the relationship of the temporal variation of electric induction versus time

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\mu^* \varepsilon_0 (U_{GS} - U_{th}) \cdot Z \cdot U_0 e^{i\omega t}}{T_{ox} \cdot L \cdot S \cdot (A + 3BD^2)} \tag{15}$$

Equation (15) has the form of an ordinary differential equation, where the electric induction varies in a nonlinear function of temperature versus time.

3 Numerical simulation and results

For numerically solve our differential equations, we use Runge-Kutta's method. First, we plot the variation of the electric induction with the temperature of the ferroelectric capacitor; we based on equation (11)

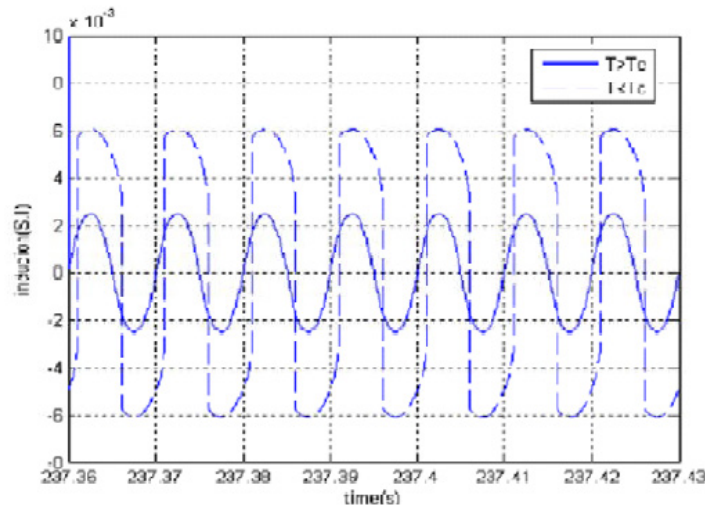


Figure 2: Variation vs. time of the electric induction for $T > T_c$ and $T < T_c$

According to Figure (2), we see that there is a good agreement with the Landau's theory, so in effect for a temperature $T = 22^\circ C < T_c$, the electric induction oscillates towers nonzero, this means in practical terms, that the dipole moment in this phase ferroelectric exist, and can be change its direction under the effect of applying electric field so we can program the FeRAM; but at a temperature $T = 24 > T_c$, the induction oscillates around a zero value, it means the non existence of the electric induction, the capacitor is discharged so we cannot program the FeRAM.

Second, we trace the variation of electric induction of the transistor, while we rely on equation (15).

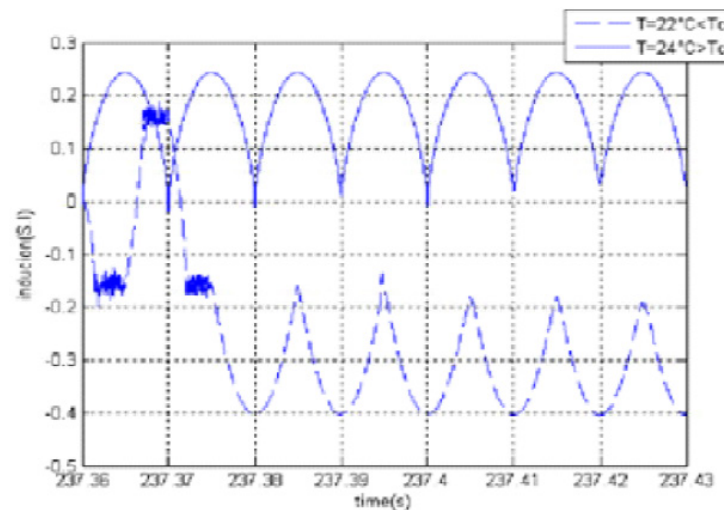


Figure 3: Variation vs. time of the electric induction with temperature and time.

From Figure (3), it is clear that the temperature of phase transition presents a problem since the value of the electric induction change, it goes from a positive value for $T > T_c$ to a negative value for $T < T_c$, thus the principle of writing of the FeRAM binary data "1" and "0" must be verified because the hysteresis loop of this memory will undergo a change

in the remanent polarization.

Third, we trace the variation of the electric induction of FeRAM according to the applied voltage.

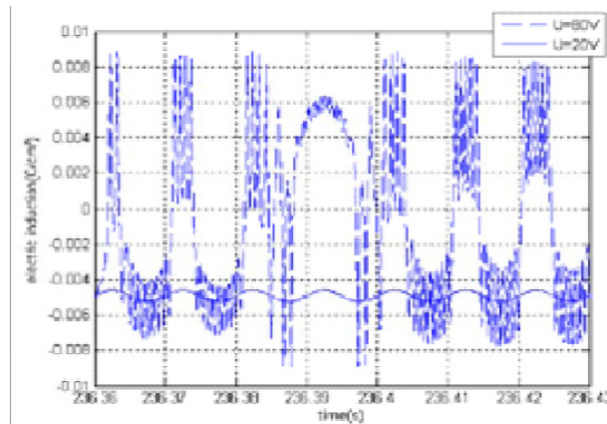


Figure 4: Variation vs. time of the electric induction with voltage.

From figure (4), we note the birth of a strange and unexpected phenomenon in more increases the value of the applied voltage to the FeRAM, the so-called chaotic behavior. But if we observe well this Figure, we note that this behavior is not really chaotic, because at a certain speed, this is called deterministic chaos [20].

4 Conclusion

At the Curie temperature, the Rochelle salt dielectric undergo phase transition, it's include in the FeRAM production increase the efficient of capacitor, but produces a nonlinearity of the electric induction behaviour.

The study of the variation of electric induction versus temperature may lead us to discover a strange phenomenon called "chaos". So we can be able to work around Curie's temperature because beyond this temperature, the electric induction towards zero and the capacitor is discharged, therefore we have problem for the construction of FeRAM.

Nomenclature

$G(P, T, E)$:	the free energy of the dielectric
E :	the electric field
P :	the polarization of the dielectric
T :	the temperature
D :	the dielectric induction
U :	the voltage
T_c :	the temperature of Curie
A_0 and B :	are two constants which depend on the dielectric medium
ε :	the dielectric constant
ε_0 :	the permittivity of the vacuum
ε_r :	the relative permittivity of the dielectric
e :	the thickness of the capacitor
S :	the surface of the electrodes of the capacitor

R :	the resistance (Ohms)
U_0 :	the amplitude of the voltage
U_{DS} :	the tension between the drain and the source of the transistor
U_{GS} :	the tension between the grille and the source of the transistor
I_{DS} :	the intensity between drain terminal and source
V_{th} :	the tension of threshold
T_{ox} :	Thickness of the gate oxide
q :	the electric charge (Cb)
t :	the time(s)
μ^* :	the mobility of the charge in the Channel
C :	the capacitance (Farad)
L :	width of the MOS transistor
Z :	the width of the grid

References

- [1] J.F. Scott, C.A. Araujo, *Science* 246 (1989):1400
- [2] C.A. Paz De Araujo, J.D. Cuchiaro, L.D. McMillan, M.C. Scott, *J.F. Scott*, Nature 374 (1995) 627
- [3] J.F. Scott, *Ferroelectric Memories*, Springer, Heidelberg, Germany, 2000
- [4] E.Tokumitsu, R.I. Nakamura, H.Ishiwara, *IEEE Electron. Device Lett.* 18 (1997) 160
- [5] K. Sugibuchi, Y. Kurogi, N. Endo, *J. Appl. Phys* 46 (1975) 2877
- [6] S.Y. Chen, C.L.Sun, S.B.Chen, A. Chin, *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002) 3168
- [7] J. Wang, J.B. Neaton, H. Zheng, V. Nagarajan, S.B. Ogale, B. Liu, D. Viehland, V. Vaithyanathan, D.G. Schlom, U.V. Waghmare, N.A. Spaldin, K.M. Rabe, M. Wuttig, R. Ramesh, *Science* 299 (2003) 1719
- [8] Z.Wen, G. Hu, S. Fan, C. Yang, W. Wu, Y. Zhou, X. Chen, S. Cui, *Thin Solid Films* 517 (2009) 4497
- [9] Y.W. Chiang, J.M. Wu, *Appl. Phys. Lett.* 91 (2007)142103
- [10] P.C. Juan, C.H. Wang, *Microelectron. Eng.* 86 (2009)1845
- [11] Chia-Liang Sun, Trevor Pi-Chun Juan, Yu-Wei Hsu , Yu-Wei Liu , Effect of processing temperature on characteristics of metal-ferroelectric(BiFeO3)-insulator (HfLaO)-silicon capacitors, *Thin Solid Films*, Vol 518, No. 24 (2010) :7433-7436
- [12] M.Ourrad, T. Benouaz, A. Cheknane, Study and Analysis of Transitions in Rochelle Salt, *International Review of Physics (I.RE.PHY)*, Vol.1, No. 5(2007): 350-355
- [13] Benouaz, F. Belkhouche and N. Ghouali, Study of the Bifurcation Generated by a Phase Transition. Application to a Nonlinear Capacitor , *International Journal*,2010
- [14] Charles Kittel, *Solid State Physics*, Eds DUNOD
- [15] Nicolas Menou, *FeRAM Technology: Reliability and failure mechanisms of ferroelectric capacitors and integrated basic*, *Thesis of university of South Toulon - Var* (2004)
- [16] D.ricinschi, C. Harnagea, C. Papusoi, L. Mitsseriuu, V. Tura, M. Okuyama, Analysis of ferroelectric switching in finite media as a landau-type phase transition, *J.phys-condens. Matter* 10 (1998):477-492
- [17] J. Bouting and A. George, *The electric field in the material*, *Vuibert* (1995)
- [18] Thierry Delage, optimization of the deposition of thin films of BSTO and YBCO layers sorting / BSTO / YBCO, growth phenomena and interfaces, application to the realization of tunable microwave components, *thesis of the University of Limoges* (2003)
- [19] Philippe Depondt, *Computational Physics*, Nonlinear Capacitor Model and Landau, P141, Eds Vuibert
- [20] M. Ourrad, Study of phase transition in the dielectric of a capacitor, *Master Thesis, University of Tlemcen, Algeria* (2007)

Résumé : Le travail dans cette thèse se veut une contribution de l'effet de la température de transition de phase sur le mode de fonctionnement des FeRAM. L'étude est basée sur l'utilisation du Modèle de Landau non linéaire. Après avoir utilisé les équations de la thermodynamique des diélectriques et le modèle de Landau pour l'étude de la transition de phase dans un condensateur ferroélectrique, nous procéderons dans un second chapitre à une présentation succincte de la technologie FeRAM, ainsi que les étapes de sa fabrication en utilisant le matériau ferroélectrique. Il s'ensuit une étude théorique de l'influence de la température sur le mode de fonctionnement des FeRAM. Finalement, le dernier chapitre est consacré à une étude de l'effet de la température de transition de phase du BST sur le mécanisme de fonctionnement des FeRAM.

Mots clés : FeRAM, FeFET, FeCAP, théorie de Landau, propriétés diélectriques.

Abstract: The work in this thesis is a contribution to the effect of the temperature of phase transition on the operating mode of FeRAM. The study is based on the use of nonlinear Landau model. After using the equations of thermodynamics of dielectrics and the Landau model for the study of phase transition in a ferroelectric capacitor, we proceed in a second chapter to a brief presentation of the FeRAM technology, as well as the stages of its manufacturing using material ferroelectric. It follows a theoretical study of the influence of temperature on the functioning mode of FeRAM. Finally, the last chapter is devoted to a study of the effect of phase transition temperature of BST on the mechanism of operation of FeRAM.

Keywords: FeRAM, FEFET, FECAP, Landau's theory, dielectric properties.

ملخص: إن العمل في هذه الأطروحة هو مساهمة لتأثير درجة حرارة المرحلة الانتقالية على طريقة تشغيل بطاقات الذاكرة FeRAM. تستند الدراسة على استخدام النموذج غير الخطي لاندو. بعد استخدام معادلات الديناميكا الحرارية للعوازل ونموذج لاندو لدراسة مرحلة انتقالية في مكثف فيروكهربائي، نشرع في الفصل الثاني إلى عرض موجز لتكنولوجيا بطاقات الذاكرة FeRAM وكذلك إلى مراحل تصنيعها باستخدام المواد الفيروكهربائية، يلي دراسة نظرية لتأثير درجة الحرارة على طريقة عمل بطاقات الذاكرة FeRAM وأخيراً، يخصص الفصل الأخير لدراسة تأثير درجات الحرارة المادة العازلة BST على آلية تشغيل بطاقات الذاكرة FeRAM.

الكلمات المفتاحية: بطاقات الذاكرة الفيروكهربائية، الترانزستور الفيروكهربائي، المكثفة الفيروكهربائية، نظرية لاندو، خصائص العوازل.