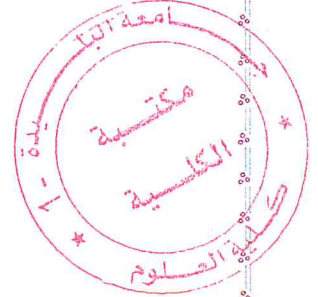


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة سعد دحلب البليدة
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية العلوم- دائرة الفيزياء
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE DE
PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN PHYSIQUE
Option : Physique Appliquée aux Microsystèmes

THÈME

*Modélisation et simulation (FEM) d'un
transistor MOSFET à grille suspendue
(SG-FET)*

Le jury composé de :

Dr. H. Tah	M.R.A, C.D.T.A., Alger	Président
I. HASSEIN-BEY	M.C.B, Université Blida 1	Examineur
I. SERHANE	M.R.B, C.D.T.A., Alger	Promoteur

Présenté par :
RAMDANI younes
MERROUAH sidiali

MA-530-131-1

Résumé

Dans les dispositifs hybrides à base de MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) et de SSD (Solid-State Devices), les transistors FET à grille suspendue (SG-FET) sont les plus importants grâce à leurs capacités à travailler à très faibles puissances et à leurs utilisations dans diverses applications mémoire. Généralement, les dispositifs SG-FET possèdent des grilles mobiles à travers le canal avec deux états stables définissant ainsi deux tensions seuils. Les systèmes à base de SG-FET peuvent être implémentés dans divers dispositifs MEMS tels que des capteurs de gaz, des microphones et systèmes à base de résonateur comme des gyroscopes à hautes sensibilités. La conception et l'optimisation de systèmes SG-FET à haute sensibilité nécessite des logiciels de simulation numérique capables de mener en même temps l'aspect électrique dans le domaine semiconducteur et l'aspect mécanique qui simule les déplacements de la grille mobile. L'utilisation de l'environnement Comsol permettra de prendre en charge le couplage entre les deux domaines. L'objectif de ce projet est de modéliser les phénomènes physiques de ces dispositifs et de les implémenter sous l'environnement Comsol afin de mener des simulations numériques FEM. Ceci afin de proposer une conception de ce microdispositif.

Abstract

In hybrid devices based on MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems) and SSD (Solid-State Devices), suspended grid FET (SG-FET) transistors are the most important thanks to their ability to work at very low power. And their uses in various memory applications. Generally, the SG-FET devices have gates moving through the channel with two stable states thus defining two threshold voltages. SG-FET-based systems can be implemented in various MEMS devices such as gas sensors, microphones and resonator-based systems such as high-sensitivity gyroscopes. The design and optimization of high-sensitivity SG-FET systems requires digital simulation software capable of simultaneously conducting the electrical aspect in the semiconductor domain and the mechanical aspect which simulates the displacement of the mobile grid. The use of the Comsol environment will make it possible to support the coupling between the two domains. The objective of this project is to model the physical phenomena of these devices and implement them under the Comsol environment in order to conduct FEM numerical simulations. This is in order to propose a design of this microdevice.

ملخص

في الأجهزة الهجينة في المجال MEMS (الأنظمة الميكرو الكهروميكانيكي) و SSD (الحالة الصلبة للأجهزة)، و (SG-FET) الترانزستور ذو مدخل المعقدة هي ذو أهمية كبيرة نظرا لقدرها على العمل بجهد اقل ونظرا لعدد استخداماتها في تطبيقات في المجال الذاكرة . عموما، الاجهزة (SG-FET) يملك مدخل متحرك فوق القناة الناقلة لتيار مع العتبة التوتر. النظم القائمة على (SG-FET) يمكن تطبيقه في مختلف الأجهزة MEMS مثل أجهزة الاستشعار الغاز، الميكروفونات والنظم القائمة على كاشف الموجات الهertzية مثل الجيروسكوب ذو حساسية عالية . تصميم والاستغلال الأمثل للأنظمة SG-FET عالية حساسية تتطلب برامج المحاكاة العددية التي يمكن أن تجري في وقت واحد الميزات الكهربائية في مجال أنصاف النواقل والى الجانب الميكانيكي الذي يحاكي حركات المدخل المعقد. فإن استخدام برنامج المحاكاة (COMSOL) يسمح مزج بين اختصاصيين . والهدف من هذا المشروع هو نمذجة الظواهر الفيزيائية لهذا الجهاز وتنفيذه تحت برنامج المحاكاة (COMSOL) التي تليها قيام بمحاكاة لنمذجة هذا الميكرو جهاز.

Remerciement

Cette thèse doit beaucoup aux nombreuses personnes qui nous ont encouragée, soutenue au long de ces années. Qu'ils trouvent ici l'expression de nôtres plus sincères remerciements.

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous adressons nôtres remerciements les plus chaleureux à toutes les personnes qui nous ont aidé au cours de ce projet et nous permis de travailler dans les meilleures conditions, toujours avec bonne humeur.

Nous remercierons donc :

- ✓ *Le Dr .H. Tahi pour avoir initialement propose le sujet de cette mémoire*
- ✓ *le Dr. H. Tahi et le Dr. A. HASSEIN-BEY d'avoir accepté de présidée et examiner cette mémoire*
- ✓ *Notre promoteur Dr. Rafik Serhane, Maître de recherche au sein de l'équipe MEMS & Sensors au CDTA Baba Hassene Alger, qui nous a dirigé dans ce travail, ainsi que les éléments de l'équipe MEMS & Sensors de la division microélectronique et nanoélectronique DMN du CDTA.*
- ✓ *Notre responsable le Docteur Abdelkader Hassein-Bey pour l'attention particulière qu'il a apporté à ce travail, pour les efforts qu'il nous a assurés pendant toute l'année. De plus nous le remercions pour nous avoir accueillies dans son équipe de physique des MEMS.*
- ✓ *Un immense merci à nous parentes pour leurs soutiens de tous les jours qui ont mis tous leurs moyens pour qu'on puisse aujourd'hui arriver à cette étape dans nos études.*

Enfinement nous tenons à remercier tous nos collègues de notre classe Où ils étaient comme nos frères et sœurs, les gens de l'Université Saad Dahlab de Blida1 de Monsieur le Recteur au petit agent de nettoyage.

TABLE DES MATIERES

Résumé	
Remerciement	
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : Etat de l'art	4
I. INTRODUCTION	5
II. LA STRUCTURE METAL-OXYDE-SEMICONDUCTEUR	6
III. TECHNOLOGIE DE FABRICATION	7
1. Nettoyage des substrats	8
2. Oxydation	8
3. Lithographie et Gravure	8
4. Diffusion d'impuretés	9
5. Dépôt de Si poly cristallin	10
6. Métallisation	10
IV. POCEDE DE FABRICATION D'UN TRANSISTOR MOS CANAL N	10
V. SALLE BLANCHE	11
VI. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN TRANSISTOR MOS	12
1. Tension de seuil VT	12
VII. DIAGRAMME DE BANDE D'UNE STRUCTURE MOS	13
VIII. LES MEMIORES MOS	14
1. Mémoires volatiles (RAM)	15
2. Les mémoires non volatiles (ROM)	15
3. Les mémoires Flash	17
IX. MARCHE DES MEMOIRES A SEMICONDUCTEURS	18
X. RESONATEURS (MOSFET / SG-MOSFET)	18

1. Montage et description de la mesure	20
XI. CAPTEURS DE GAZ MOS	22
1. Capteurs de gaz MOSFET	22
2. Capteurs de gaz SG-FET	23
3. Couche sélective pour gaz cible	24
XII. CONCLUSION	25
CHAPITRE 2 : SG-MOSFET	26
I. INTRODUCTION	27
II. PRNcipe DE FONCTIONNEMENT D'UN TRANSISTORS SG-MOFET	29
III. MODELISATION ANALYTIQUE	31
1. Pull in	31
2. Pull out	35
IV. POSITION SG-MOSFET EN FONCTION DE LA TENSION DE LA GRILLE	37
V. CONCLUSION	39
CHAPITRE 3 : Modélisation et simulation multiphysique	40
I. INTRODUCTION	41
II. COMSOL MULTI PHYSIQUE	41
III. MODELISATION DU COMPORTEMENT DE PULL IN	41
1. Problématique	42
IV. MODELISATION ET SIMULATION PULL IN	42
1. Présentation du modèle	42
2. Simulation du pont vibrant 2D	43
a. les paramètres et la géométrie	43
b. la physique	44
c. Matériaux	44
d. conditions aux limites de la physique	45
e. le maillage	50
f. l'étude	51
3. Simulation du SG-MOSFET	51

a. Paramètre	51
b. géométrie	52
c. la physique	52
d. les matériaux	53
e. les conditions aux limites pour semiconducteur	55
f. le maillage	55
g. L'étude	56
V. CONCLUSION	56
CHAPITRE 4 : Résultats et discussion	57
I. INTRODUCTION	58
II. MOSFET NORMAL	58
III. MOSFET A GAP	60
IV. RESONATEURE (PONT VIBRANT) EN MODE PULL IN	62
1. Pour un pont de longueur de $3\mu\text{m}$	62
2. Pour un pont de longueur de $2\mu\text{m}$	63
3. Pour un pont de longueur de $1.6\mu\text{m}$	64
V. SG-MOSFET	64
VI. CONCLUSION	68
CONCLUSION GENERALE	69
BIBLIOGRAPHIE	
TABLE DES FIGURES	
Annexe A	
Annexe B	

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui il est possible de miniaturiser toutes sortes de systèmes complexes, qu'ils soient optiques, électromécaniques ou fluidiques. Cette miniaturisation vise à réduire la consommation en énergie, abaisser les coûts de production et augmenter les performances, c'est ainsi qu'a émergé le domaine des MEMS (MicroElectro Mechanical Systèmes) [1].

MEMS est une technologie dispositif utilisée pour créer des appareils minuscules ou systèmes intégrés qui combinent des composants mécaniques et électriques. Ils sont fabriqués en utilisant des techniques qui peuvent varier la taille de quelques micromètres à des millimètres. Ces dispositifs ont la capacité de détecter, de contrôler et d'actionner sur la micro-échelle et de générer des effets sur la macro-échelle.

Le caractère MEMS interdisciplinaire utilise la conception, d'ingénierie et de fabrication dans un différent domaine techniques, compris la technologie de fabrication de circuits intégrés, l'ingénierie mécanique, la science des matériaux, l'ingénierie électrique, la chimie et l'ingénierie chimique, ainsi que l'ingénierie fluide, l'optique, l'instrumentation Et l'emballage. MEMS peut être trouvé dans des systèmes allant des applications automobiles, médicales, électroniques, de communication et de défense. Les dispositifs MEMS actuels incluent des accéléromètres pour détecteurs de coussins gonflables, des têtes d'imprimante à jet d'encre, des cartes de lecture / écriture de lecteur de disque informatique, des capteurs de pression sanguine, des interrupteurs optiques, des micro vannes, des biosensors et de nombreux autres produits qui sont tous fabriqués et expédiés dans des volumes commerciaux élevés.

MEMS a été identifié comme l'une des technologies les plus prometteuses pour le 21ème siècle et a le potentiel de révolutionner les produits industriels et les produits de consommation en combinant la microélectronique à base de silicium et la technologie micromécanique. Ses techniques et les appareils à base de microsystèmes peuvent affecter considérablement toutes nos vies et notre façon de vivre. Si la micro fabrication de semi-conducteurs a été considérée comme la première révolution, MEMS est la deuxième révolution.

Application des MEMS sont :

Transducteur : Un transducteur est un dispositif qui transforme une forme de signal ou d'énergie en une autre forme. Le terme transducteur peut donc être utilisé pour inclure à la fois les capteurs et les actionneurs et est le terme le plus générique et largement utilisé dans MEMS.

Capteur : Un capteur est un dispositif qui mesure les informations provenant d'un environnement et fournit un signal électrique de sortie. Au cours des années cette information a été classés en fonction du type de domaines énergétiques, mais les périphériques MEMS se chevauchent généralement de plusieurs domaines ou

n'appartiennent même pas à une seule catégorie. Ces domaines d'énergie comprennent :

Mécanique : force, pression, vitesse, accélération, position

- Température thermique, entropie, chaleur, flux de chaleur
- *Chimique* : concentration, composition, taux de réaction
- *Radiant* : intensité de l'onde électromagnétique, phase, longueur d'onde,
- *Électrique* : tension, courant, charge, résistance, capacitance, polarisation

Actionneur : Un actionneur est un dispositif qui convertit un signal électrique en une action. Il peut créer une force pour se manipuler, d'autres dispositifs mécaniques ou l'environnement environnant pour effectuer une fonction utile.

A fin de décrire et mettre en évidence les différents étapes suivies lors de notre projet, nous avons adopté la répartition suivante pour la rédaction de notre mémoire

- **Chapitre 1** : ce chapitre de ce manuscrit débutée par l'historique de la création des transistors *mos* et l'innovation de l'industrie des semiconducteurs, avec les procédée de la micro fabrication des *MOSFET* et nous allons présentée la description et le fonctionnement des *MOSFET* avec le challenge de miniaturisation nous terminons avec les application a base te transistor *MOS* dans le domaine des mémoires , résonateur et capteur de gaz..
- **Chapitre 2** : le deuxième est consacré pour présentée le transistor *SG-MOSFET* Principe de fonctionnement et les théorèmes qui explique de fonctionnement et leur réponse à partir des graphes.
- **chapitre 3** : dans ce chapitre nous allons proposer, pour le couplage du domaine électrique semiconducteur et de la electromechanique dans un seul paquet *FEM*. En adaptant ces deux domaines différents, les simulations *FEM* ont été effectuées instantanément pour les caractéristiques du dispositif.
- **chapitre 4** : dans ce chapitre on a montré les résultats de la simulation *SG-MOSFET* qui relie le effet de l'état solide du *MOSFET* et la vibration du micro pont sur la Platform du logiciel *COMSOL* et on a validé la physique pour ce modèle 2D

Dans le dernier chapitre « chapitre 5 », on termine avec une conclusion de l'étude

CHAPITRE 1

Etat de l'art

I. INTRODUCTION

Les transistors à effet de champ ont été brevetés par *Lilienfield* et *Heil* en 1930. Cependant des difficultés technologiques très importantes ont retardé sa réalisation pratique. En effet, il n'apparaîtra sous sa forme moderne qu'en 1955 grâce à *Ross*. Cela bien après la réalisation par *Shockley* en 1947 du premier transistor de type bipolaire, pourtant théoriquement bien plus sophistiqué. C'est en 1960 que *Kahng* et *Attala* ont présenté le premier transistor *MOS* sur Silicium en utilisant une grille isolée dont le diélectrique de grille était en oxyde de silicium SiO_2 . Le silicium II est l'élément le plus abondant de la croûte terrestre, après l'oxygène. De plus son oxyde est non seulement un très bon isolant électrique mais il s'est aussi adapté pour former des couches dites de passivation protégeant les circuits, accroissant remarquablement leur fiabilité [5].

Les transistors *MOS*, plus simples et moins chers que leurs concurrents bipolaires, mais au fond moins performants à génération technologique équivalente, ont connu leur essor dans les années 70-80 grâce à la technologie *CMOS* inventée en 1968 qui consomme très peu d'énergie. Ainsi des systèmes à bas prix possédant une grande autonomie ont été très largement diffusés : montres à quartz, calculatrices... [5].

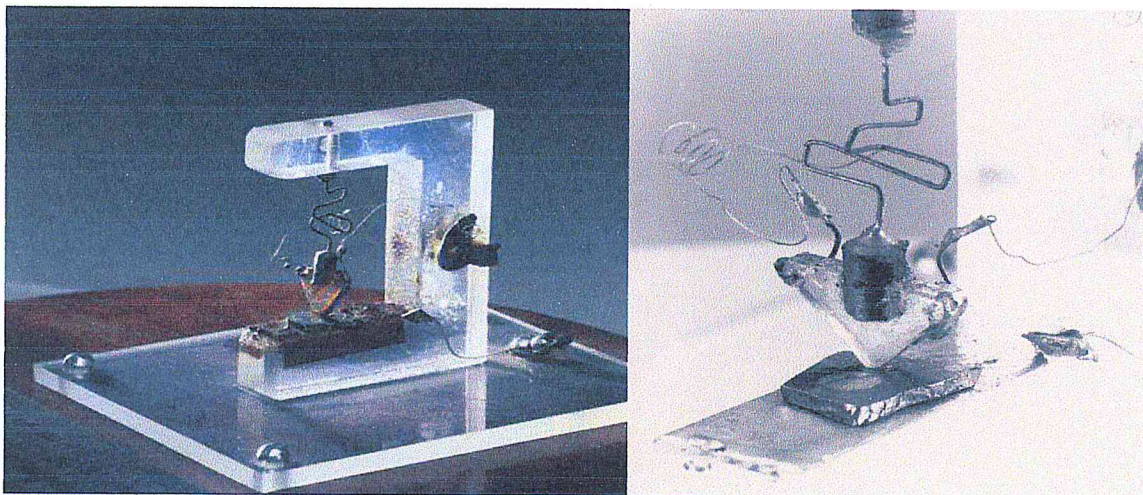


Figure (1.1) premier transistor de type bipolaire par *William Bradford Shockley* en 1947 [44]

Depuis, les applications en logique *CMOS* et aussi les mémoires qui constituent l'autre grande application des *MOSFET* ont bénéficié d'une très forte et continue augmentation de leur rapidité et de leur densité d'intégration [5].

II. LA STRUCTURE METAL-OXYDE-SEMICONDUCTEUR

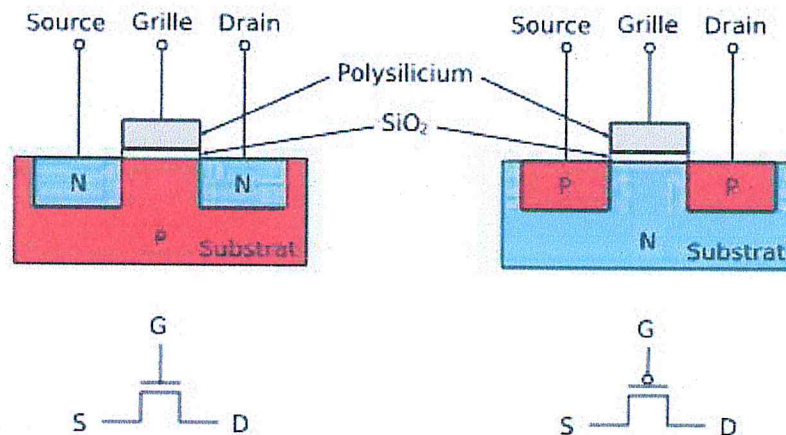


Figure (1.2) Vue schématique du transistor *MOS* de (type N) et (type P) [45].

En général, un transistor *MOS* contient une grille (*G*) en silicium (polycristallin) séparée du substrat en silicium monocristallin par une mince couche de diélectrique, généralement le dioxyde de silicium SiO_2 , les régions source et drain font partie du substrat, dont elles diffèrent par leur type de conduction [3].

On considère un substrat du silicium dopé P, dans lequel sont implantées les deux électrodes source et drain, elles sont équivalentes à des réservoirs d'électrons de chaque côté du canal. Une couche mince de SiO_2 isole le canal d'une métallisation constituant l'électrode de grille. La tension appliquée sur l'électrode de grille assure le contrôle de la conductivité du canal. La tension de grille va permettre le passage d'un courant électrique entre la source et le drain [3].

Lorsqu'une tension négative est appliquée à la grille, les trous majoritaires sont attirés vers l'interface Oxyde/Semiconducteur, on dit que la capacité *MOS* fonctionne en régime d'accumulation. Un canal de conduction de type p est alors créé entre la source et le drain. Lorsqu'une tension positive est appliquée à la grille, les électrons minoritaires sont attirés vers l'interface Oxyde/Semiconducteur ; un canal conducteur de type n est alors créé entre la source et le drain, on dit que la capacité *MOS* fonctionne en régime d'inversion [3].

Suivant le type des porteurs assurant le passage du courant, on peut parler des transistors à canal N qu'on appelle *NMOS* et des transistors à canal P appelé *PMOS* [3].

Pour un *NMOS*, la grille doit être polarisée positivement pour créer un canal de conduction rempli d'électrons mobiles à la surface d'un semiconducteur de type P. La tension V_{DS} doit être positive afin de drainer ces électrons ; le courant circule donc du drain vers la source. Pour un *PMOS*, la grille doit être polarisée négativement pour créer un canal de conduction rempli de trous mobiles à la surface d'un semiconducteur de type N. La tension V_{DS} doit être négative afin de drainer ces trous ; le courant circule donc de la source vers le drain. Chacun de ces deux transistors peut avoir une construction à canal « surfacique » ou à canal « enterré » [3].

Le canal surfacique (aussi appelé canal d'inversion) est induit électrostatiquement par l'effet de champ, il est de type des porteurs, N ou P, et donc opposé (d'où le nom d'inversion) à celui du substrat, mais de même type que les régions de source et de drain, rendant ainsi le passage du courant possible. Notons que si la couche d'inversion n'est pas créée par l'effet de champ, la structure se réduit à deux diodes en tête-bêche (jonction N+PPN+) pour un *NMOS* ou P+NNP+ pour un *PMOS* [3]; comme la (Figure 1.2) montré.

Le canal enterré (aussi appelé canal d'accumulation) est un canal constitué par une fine couche fixe (dite enterrée) du semiconducteur dopé, du même type de conduction que les régions de source et de drain. Si cette couche est suffisamment épaisse, le passage du courant est autorisé même sans l'effet de champ, car le canal représente une résistance (N+NN+). Une polarisation positive de la grille pour le *NMOS* (négative pour le *PMOS*) induit une accumulation de porteurs dans le canal, augmentant ainsi le niveau de conduction. Une polarisation contraire, négative pour le *NMOS* (positive pour le *PMOS*), appauvrit le canal de porteurs libres, le rendant ainsi bloqué pour la conduction [3]. (Figure 1.3) montre différents types de canal.

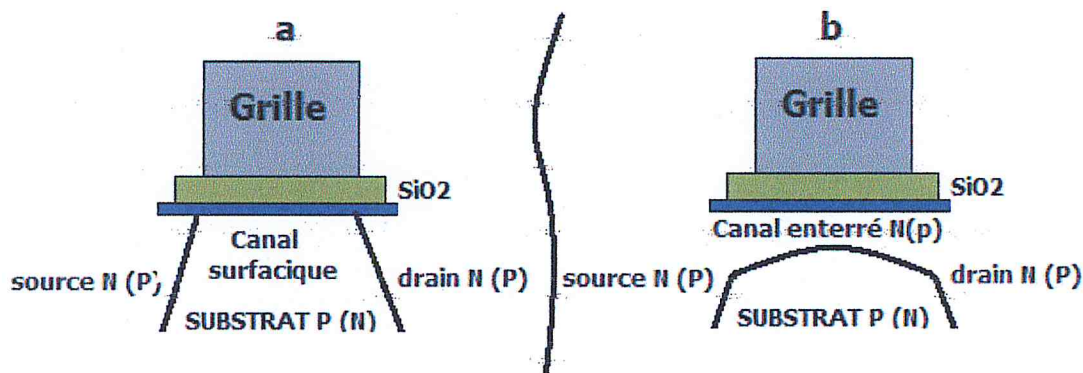


Figure (1.3) : différents types de canal pour un transistor *MOS*.
(a) à canal surfacique(b) à canal enter [46]

III. TECHNOLOGIE DE FABRICATION

Le matériau de base est une tranche (« *wafer* ») de Si monocristallin ayant environ 500 μm d'épaisseur, 15 à 30 cm de diamètre, dopée n ou p, dont la surface est traitée de manière à présenter un poli optique (rugosité de quelques dixièmes de nanomètres) [4]. Et tout le traitement se fait en surface:

- ✓ **Nettoyage des substrates**
- ✓ **oxydation**
- ✓ **gravure**
- ✓ **diffusion d'impuretés**
- ✓ **dépôt de Si polycristallin**
- ✓ **métallisation**

1. Nétoyage des substrates

L'opération de nettoyage est indispensable avant chaque étape technologique principale et correspond elle aussi à une longue suite d'opérations élémentaires. En effet, si une plaquette ou un substrat a attendu entre deux étapes majeures, il faut procéder à un dégraissage et un décapage de la surface en éliminant l'ensemble des impuretés ainsi que l'oxyde natif du silicium qui se forme automatiquement s'il n'est pas recouvert d'une couche protectrice [4].

- 3 min dans un bain de trichloroéthylène chaud (dégraissage),
- 3 min dans un bain d'acétone (pour enlever le trichloroéthylène),
- 3 min dans de l'alcool éthylique (pour enlever l'acétone),
- 5 min dans de l'eau dés ionisée,
- 10 min dans la solution basique SC1 ($3 \text{ NH}_4\text{OH} + 7\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}_2$) à ébullition (élimine les impuretés organiques en régénérant l'oxyde natif),
- 5 min dans de l'eau dés ionisée,
- 10 min dans la solution acide ($\text{HCl} + 6 \text{ H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2$) à ébullition (élimine les impuretés métalliques en régénérant l'oxyde natif),
- 5 min dans de l'eau dés ionisée,
- 1 min dans de l'acide fluorhydrique (élimination de l'oxyde natif)
- 5 min dans de l'eau dés ionisée.

2. Oxydation

Le silicium présente trois avantages sur les autres semiconducteurs [4] :

- ✓ il s'oxyde facilement,
- ✓ l'oxyde est un excellent isolant électrique,
- ✓ l'oxyde constitue un masque pour les impuretés autres que l'oxygène lui-même.

Il y a deux types d'oxydation **sèche et humide** :



$T=800^\circ\text{C}-1200^\circ\text{C}$

3. Lithographie et Gravure

Une résine photosensible est déposée à la surface de la tranche de silicium. Elle est exposée à un rayonnement ultra-violet à travers un « masque ». Dans le cas d'une résine « négative », les régions exposées deviennent plus résistantes aux solvants que les régions non exposées (réticulation du polymère). Dans le cas d'une résine

« Positive », les régions exposées deviennent plus solubles que les régions non exposées (destruction de liaisons entre les chaînes). La résine est ensuite plongée

dans un solvant de manière à éliminer les régions non exposées (pour une résine négative) ou les régions exposées (pour une résine positive) [4].

La tranche de silicium est ensuite plongée dans un bain acide ($\text{HF} + \text{NH}_4\text{F}$) si l'on utilise une technique de gravure « humide », ou est soumise à un plasma si l'on utilise une technique de gravure « sèche ». Dans un cas comme dans l'autre, l'oxyde est attaqué aux endroits où il n'est pas protégé par la résine. Enfin, la résine restante est éliminée par passage dans un solvant (acétone) [4].

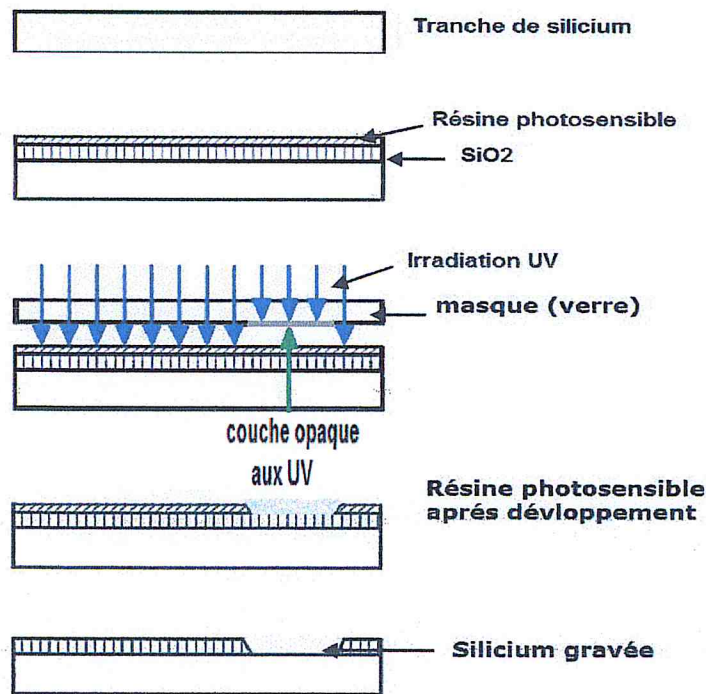


Figure (1.4): les étapes de la TECHNOLOGIE DE FABRICATION [47]

4. Diffusion d'impuretés

Cette opération c'est pour doper le silicium, elle consiste à introduire des atomes ionisés projectiles avec suffisamment d'énergie pour pénétrer dans l'échantillon cible (en général une plaquette). Cette pénétration ne s'effectue que dans des régions de surface. Cette opération est essentiellement utilisée pour doper le semiconducteur durant la fabrication des dispositifs (création de zones de source ou de drain d'un transistor *MOS*. Les atomes dopants sont en général : B, P, As, In, etc...) [4].

Les énergies des atomes ionisés peuvent être dans la gamme 3 keV à 500 keV. En fonction de la nature du matériau implanté, de la nature de l'ion accéléré et de l'énergie d'accélération la profondeur moyenne de pénétration peut aller de 100 Å à 1 mm. En effet, un calcul approximatif montre qu'une centaine d'électronvolts est perdue par couche atomique (environ 2,5 Å) [4].

5. Dépôt de Si polycristallin

Le silicium poly cristallin peut être dopé comme le silicium monocristallin, mais il a une plus grande résistivité, donc il peut être utilisé pour constituer des résistances plus élevées. Il est surtout utilisé pour réaliser les grilles des transistors MOS car il constitue un masque pour les impuretés et pour l'oxygène [4].

6. Métallisation

Les interconnexions entre composants sont généralement réalisées en aluminium déposé par pulvérisation cathodique [4].

IV. POCEDE DE FABRICATION D'UN TRANSISTOR MOS CANAL N

Il s'agit dans ce cas de réaliser des transistors MOS dans un même substrat. La réalisation de transistors MOS à canal N à enrichissement. Cela signifie qu'il faut réaliser dans un substrat de type p qui constituera la zone de canal, les deux zones très dopées de type n qui constitueront la source et drain. L'oxyde de grille sur la zone de canal devra être de très bonne qualité électronique. La fin du procédé consistera à réaliser les zones de contacts de grille, de source et de drain [4].

Les principales étapes du procédé :

- nettoyage du substrat,
- oxydation épaisse et après déposition Si poly cristallin,

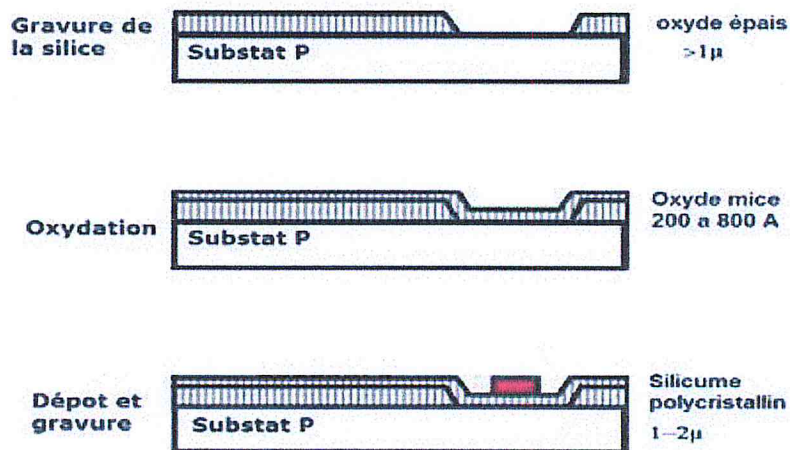


Figure (1.5): les premières étapes de POCEDE DE FABRICATION D'UN TRANSISTOR MOS CANAL N [48]

- gravure d'ouverture de la source et drain,
- dopage au phosphore (diffusion ou implantation ionique),
- oxydation fine de l'oxyde de grille,
- implantation ionique de Bore,
- photolithographie d'ouverture des contacts de source et de drain,
- dépôt d'aluminium,
- gravure de l'aluminium,

- recuit final sous *forming-gas* (mélange d'azote et d'hydrogène à 10%) pour améliorer les contacts,

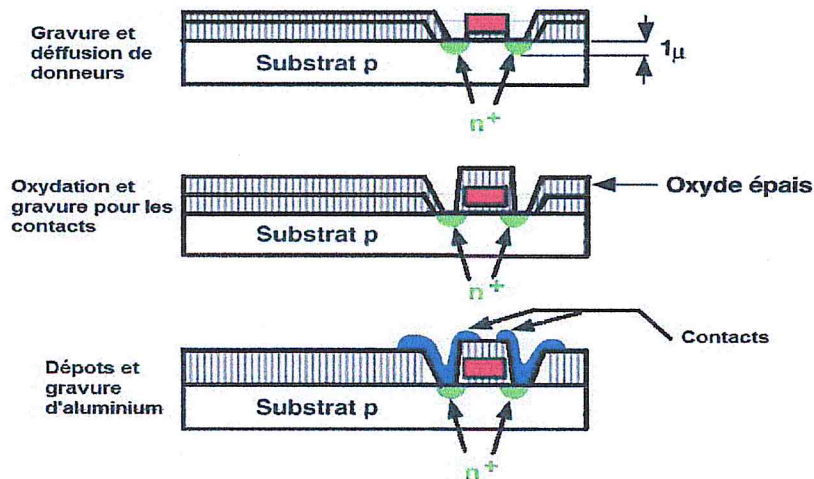


Figure (1.6): les étapes fondamentales de POCEDE DE FABRICATION D'UN TRANSISTOR MOS CANAL N [49]

Ce procédé très simple permet de réaliser des transistors *MOS* ; il correspond aux premiers procédés *MOS* mis en œuvre industriellement au début des années 70. Compte tenu des différentes étapes de masquage nécessitant des alignements, pour diminuer les dimensions des transistors il a fallu trouver des méthodes permettant de positionner automatiquement les zones de source et drain par rapport à la grille [4].

V. SALLE BLANCHE

Fabrication s'effectuera dans une salle blanche, salle ou l'atmosphère et la température et humidité et le nombre de particules de poussières doit être le plus faible possible. le principal souci en cours de la fabrication sera la propreté. que Une seule poussière de dimension micronique se dépose sur une puce de plusieurs millions de transistors peut rendre inutilisable.

On définit la "classe de propreté" par le nombre de particules de diamètre supérieur à $0,5 \mu\text{m}$ par pieds cube ; 1 pieds = 1 ft = 30 cm, c'est-à-dire que $1\text{ft}^3 = 0,027 \text{ m}^3 = 27 \text{ litres}$. La notion de salle blanche commence lorsque la classe est inférieure ou égale à 1000. Dans une atmosphère ambiante normale, la classe serait de 1 à 10 millions. Une bonne salle blanche industrielle est actuellement de classe 1 voire 0,1. Ceci nécessite des équipements nombreux et coûteux. En effet, l'atmosphère d'une salle blanche de production doit être entièrement renouvelée toutes les 7 secondes en évitant toute turbulence dans les zones de travail. Plusieurs millions de mètres cube d'air sont ainsi soufflés et filtrés par heure dans une usine de production [4].

Il faut éviter toute introduction de poussière, en particulier par les opérateurs et personnels. C'est la raison pour laquelle, toute personne entrant en salle blanche doit être entièrement équipée de vêtements spéciaux (qui ne "peluchent" pas), de gants, cagoules, sur chausseuses ou chaussures spéciales, etc... Une "douche d'air",

pouvant durer plusieurs minutes, prise dans le sas d'entrée est nécessaire [4]. Il est donc clair que tous les équipements permettant d'effectuer le travail des plaquettes seront installés en salle blanche ou dans des enceintes à atmosphère rigoureusement contrôlée [4].

VI. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN TRANSISTOR MOS

Un transistor est un interrupteur commandé, un faible signal électrique (courant ou tension), dit commande, doit contrôler un signal électrique. Cela permet deux types de fonctionnement : soit en amplification pour les applications de type analogique [5], soit pour les applications logiques qui vont nous intéresser plus tard. Le principe de fonctionnement d'un tel dispositif est schématisé en Figure (1.7). La tension de grille crée un champ vertical qui, par l'intermédiaire de la capacité MOS, module la densité de porteurs libres à l'interface Substrat/Oxyde permettant ainsi de commander sa conductivité. Ce phénomène est appelé « effet de champ » [5].

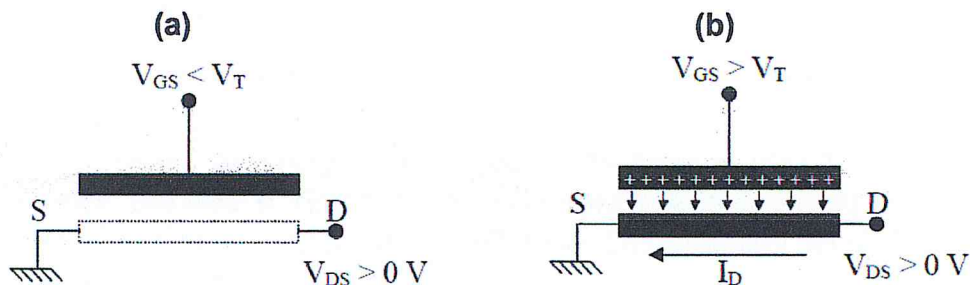


Figure (1.7) : Principe de fonctionnement d'un transistor MOS. (a) Etat bloqué. (b) Etat passant [50]

Lorsque la tension de grille ne permet pas de charger « convenablement » les électrodes de la capacité MOS, aucun courant ne peut circuler entre la source et le drain quelle que soit la tension appliquée à l'électrode de drain ; c'est l'état bloqué. Comme illustré en Figure (1.7), a ; pour le type de transistor étudié, la tension de grille V_{GS} appliquée doit être inférieure à une tension de seuil notée V_T . Ces transistors bloqués à tension de grille nulle sont dits « *normally off* » (par opposition aux « *normally on* », tels les transistors à canal N pré implanté) [5].

Lorsque V_{GS} devient supérieure à V_T , le nombre de porteurs libres à l'interface Substrat/Oxyde est suffisant pour qu'ils forment un « canal » conducteur (si et seulement s'ils sont du même type que ceux des réservoirs de source et drain). Si, comme illustré sur la Figure (1.7) pour b, les porteurs du canal sont des électrons, exemple (le transistor est dit à canal N et est appelé NMOS. Lorsque la tension de drain devient positive, un courant de drain I_D peut circuler dans le canal, c'est l'état passant) [5].

- la tension de seuil V_T

La tension de seuil d'un transistor MOS est définie comme étant la tension minimale de la tension de grille qui doit être appliquée pour former une couche

- E_c : Energie du bas de la bande de conduction du semiconducteur ;
- E_v : Energie du haut de la bande de valence du semiconducteur ;
- E_{FSC} : Energie du niveau de Fermi du semiconducteur ;
- E_{Fm} : Energie du niveau de Fermi du métal ;
- E_G : Energie de la bande interdite ;
- Φ_m : Travail de sortie du métal;
- Φ_{sc} : Travail de sortie du semiconducteur;
- A_{sc} : Affinité électronique du semiconducteur ;
- V_G : Tension appliquée sur la grille ;
- V_b : chute de potentiel dans l'isolant ;
- Ψ_s : potentiel de surface;

VIII. LES MEMIORES MOS

Les types de mémoires sont apparus depuis l'invention du premier circuit intégré monolithique par *Jack Kilby* en 1958. Cette diversité représentée dans figure (1. 9) s'explique par une grande variété de besoins. En effet, chaque système exiger un type de mémoire aux performances précises (durée de rétention de l'information, tension d'alimentation, consommation, vitesse d'écriture, vitesse de lecture, dimensions) La recherche de ces performances induit un cahier de charges qui exigera un procédé de fabrication plus ou moins coûteux. Le compromis entre les performances recherchées, les limites technologiques et les contraintes économiques définira les caractéristiques principales de chaque type de mémoire. On divise généralement les mémoires à semiconducteurs en deux grandes classes [6]: les mémoires volatiles connu sous le nom *RAM (Random Access Memories)* et les mémoires non-volatiles appelées *ROM (Read Only Memory)*.

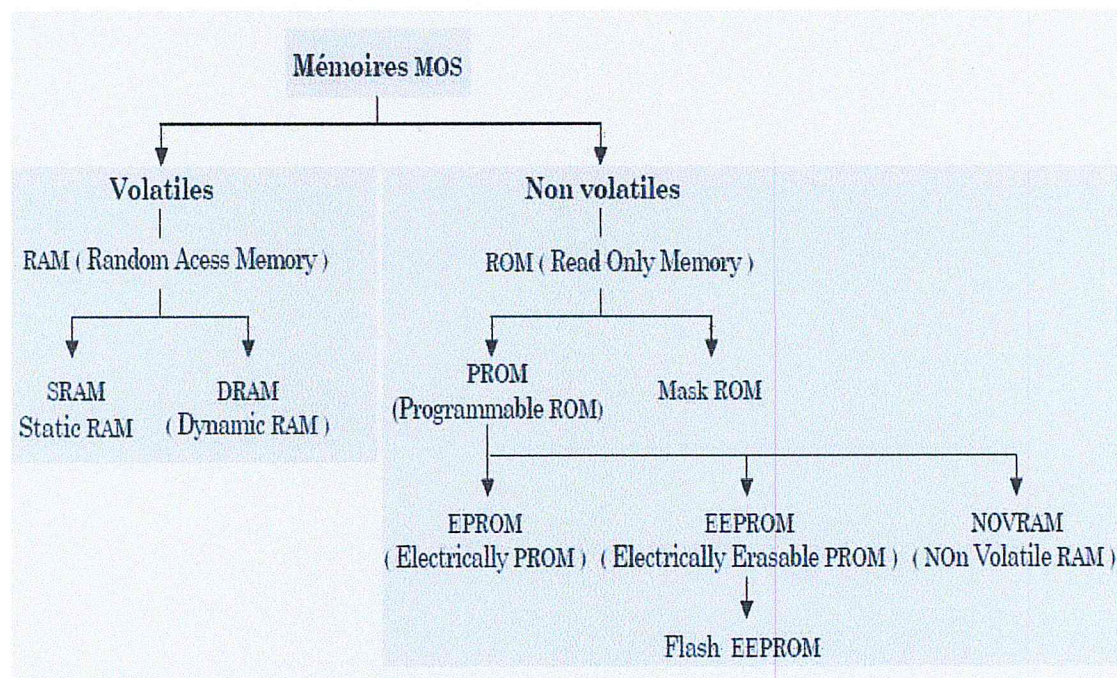


Figure (1.9) : Classification des principales mémoires MOS [52]

1. Mémoires volatiles (RAM)

Les mémoires volatiles, perdent leur l'information en l'absence d'alimentation électrique. Les deux types les plus connus de mémoires volatiles sont la *SRAM* (*Static RAM*) et la *DRAM* (*Dynamic RAM*) [6].

a. SRAM

La *SRAM* est la plus rapide de toutes les mémoires à semiconducteurs, mais elle est très couteuse. Elle retient les données aussi longtemps que l'alimentation électrique est maintenue et n'exige pas de rafraîchissements à intervalles réguliers [6]. La *SRAM* sont utilisée dans les mémoires cache des ordinateurs.

b. DRAM

La *DRAM* peut être réalisée avec un seul transistor comme la figure (1.10) montre Son schéma de fonctionnement, la ligne de bit est forcée à l'état logique « 1 » (ou « 0 ») tout en activant la ligne de mot. Ainsi, le transistor d'accès est actif et on peut charger la capacité de stockage à l'état logique désiré. il suffit d'activer le transistor d'accès, permettant ainsi de propager sur la ligne de bit la différence de potentiel aux bornes de la capacité de stockage. La variation de potentiel provoquée par les charges stockées dans la capacité sur la ligne de bit permet ensuite à des circuits annexes de déterminer l'état logique de la cellule. Cette structure lui confère un faible coût et une surface réduite, qui permet une grande densité d'intégration. L'opération de lecture d'une *DRAM* provoque la décharge de la capacité de stockage dans la ligne de bit [6].

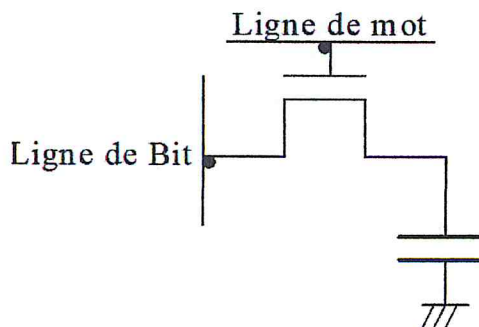


Figure (1.10) : Cellule mémoire *DRAM* à un transistor [53]

Ainsi, des circuits annexes doivent copier la valeur qui a été lue pour la réécrire ensuite dans la cellule. Le deuxième problème posé par la *DRAM* provient des fuites de la capacité de stockage : la cellule doit être rafraîchie régulièrement [6].

2. Les mémoires non volatiles (ROM)

La première mémoire *MOS* non volatile présente en 1967, composée d'un transistor *MOS* dont la grille était remplacée par un empilement de couches conductrices et non conductrices. De nos jours, les mémoires non volatiles sont toujours présentes dans nos jours avec les cartes bancaires, les téléphones

mobiles, les décodeurs de télévision, les ordinateurs personnels, la gestion des moteurs automobiles et d'autres applications nécessitant de sauvegarder l'information de façon permanente même après rupture de l'alimentation [7].

a. ROM

Les mémoires *ROM* (*Read Only Memory*) sont destinées uniquement à être lues, et sont généralement utilisées pour les jeux vidéo. Le fonctionnement d'une *ROM* est basé sur celui du point mémoire qui est généralement constitué d'un transistor *NMOS* (ayant une grille flottante) adressé en lecture par une ligne de bit connectée au drain et une ligne de mot (*word line*) connectée à la grille [6].

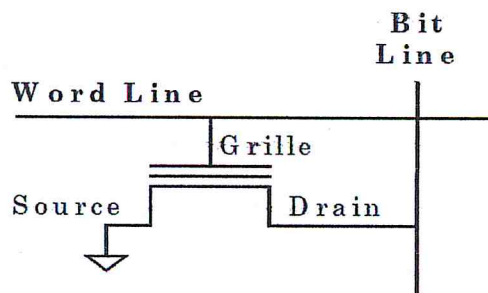


Figure (1.11) : Schématisation d'un point mémoire [54]

b. EPROM

L'*EPROM* (*Erasable Programmable Read Only Memory*) permet d'effacer et de programmer les cellules. Elles sont largement utilisées dans les outils de bureautique comme dans les photocopieurs, les imprimantes lasers, dans les automates programmables, etc). L'écriture se fait par stockage d'électrons dans une grille isolée. L'opération d'effacement par rayons Ultra Violets (UV) des *EPROMs* reste néanmoins lourde à mettre en œuvre : elle suppose un démontage du boîtier de son support et un passage de 15 à 20 minutes sous rayons UV. De plus, les *EPROMs* utilisent des boîtiers coûteux à fenêtre de quartz pour permettre ce type d'effacement [7]. Le problème principal c'est la fiabilité de mémoire est restée faible.

c. EEPROM

Les *EEPROM* (*Electrically Erasable PROM*), développées dans les années 1970, pour résoudre le problème de l'effacement UV par un effacement bit par bit de type électrique qui évite de retirer le circuit du système électronique pour reprogrammer la mémoire. Les *EEPROM* sont en partie dédiées aux applications militaires ou spatiales. Les *EEPROM* utilisent une surface équivalente à deux transistors par cellule mémoire le premier est utilisé comme transistor de sélection et le second est l'élément de stockage. La cellule mémoire *EEPROM* est traditionnellement réalisée en technologie *FLOTOX* (*FLOting gate Thin OXide*). Le point critique est l'utilisation d'un oxyde de grille très mince qui sépare le drain de la grille flottante et une surface occupée importante. Sous l'effet d'un champ électrique intense de l'ordre de 10 MVcm^{-1} , des électrons passent par effet tunnel à travers cet oxyde mince, du drain vers la grille flottante ou inversement suivant le sens du

champ électrique. Ainsi cette injection d'électrons fait varier la quantité de charges de la grille flottante ce qui modifie la tension de seuil du transistor [7].

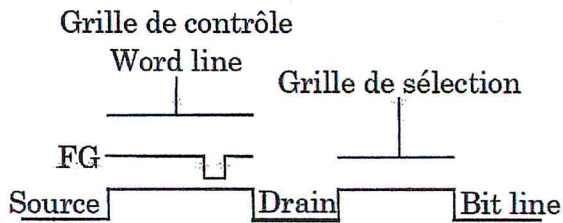


Figure (1.12) : Schéma équivalent de la cellule EEPROM composée du transistor d'état en série avec le transistor de sélection. [55]

3. Les mémoires Flash

En 1984 l'apparition de première mémoire flash présentée par Masuoka. La mémoire Flash est constituée d'un transistor MOS dont la structure de la grille a légèrement été modifiée avec une grille de contrôle et une grille flottante (F_G) emprisonnée dans l'isolant [7].

La figures (1.13 a et b) montrent une coupe SEM (Scanning Electron Microscopy) et le schéma électrique équivalent d'une mémoire Flash. On peut identifier les trois composants principaux que sont : le transistor MOS (avec sa capacité C_{ox}), la capacité inter-poly (C_{ono}) et la capacité de recouvrement de la source (C_{tun}). [7].

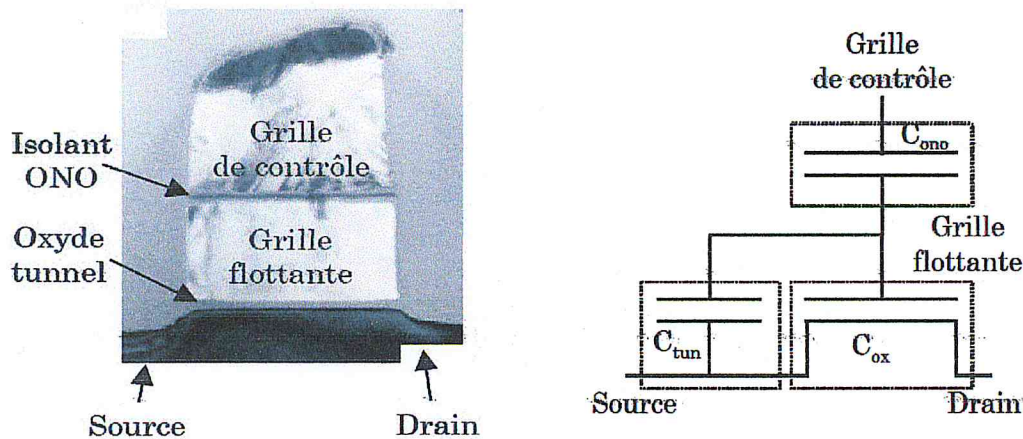


Figure (1.13) a : Coupe SEM (Scanning Electron Microscopy) d'une mémoire de type Flash
 b : schéma électrique équivalent faisant apparaître les différentes capacités [56]

IX. MARCHE DES MEMOIRES A SEMICONDUCTEURS

Parallèlement à l'industrie des semiconducteurs, le volume de marché occupé par les mémoires. Cette croissance a été notamment due à la très forte demande dans beaucoup d'application. Dans les années 2000. Les prévisions de la *SIA* (*Semiconductor Industry Association*) annonçaient respectivement un volume global de 204 et 319 milliards de dollars en 2000 et en 2003 pour toute l'industrie des semiconducteurs. Les mémoires occuperaient 20% et 27% de ce marché en 2000 et en 2003 avec respectivement 49 et 88 milliards de dollars [6].

Prévisions de volumes du marché des mémoires à semiconducteurs pour les années 2000 et 2003

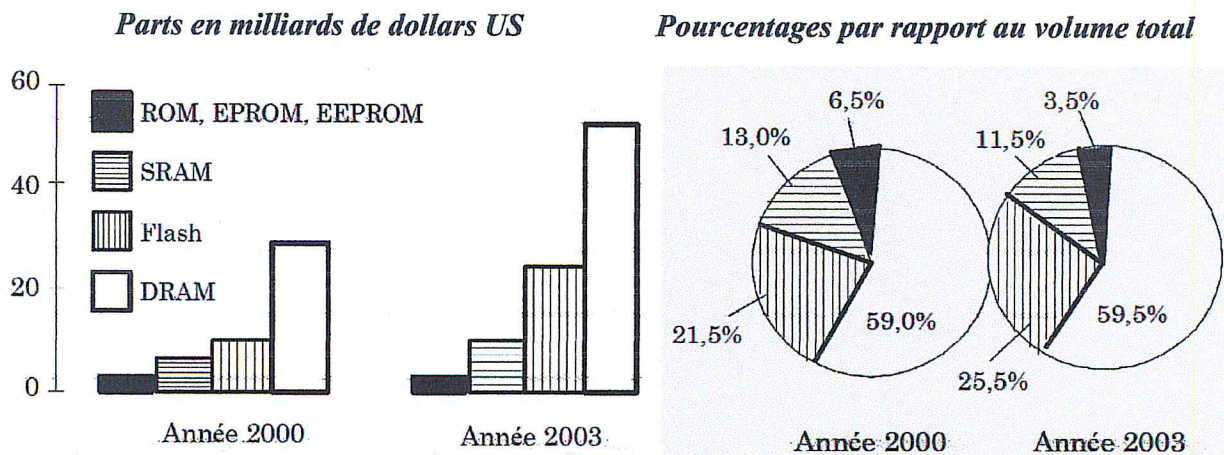


Figure (1.14) : Prévisions de volumes du marché des mémoires à semi conducteurs pour les années 2000 et 2003. (Source : *Semiconductor Industry Association*) [57]

L'inégale répartition de ce marché : en 2000, la *DRAM* arrive largement en tête avec 59% de l'ensemble, suivie de la *Flash* (21,5%), de la *SRAM* (13%) et enfin des *ROM, EPROM* et *EEPROM* (6,50%). Lorsque l'on regarde l'évolution de la proportion respective de chaque type de mémoire sur la période s'étendant de 2000 à 2003, on constate que la *Flash* connaît la plus forte augmentation avec 4% de part gagnée, suivie de la *DRAM*, à peu près stable avec 0,5% d'augmentation [6].

A l'opposé, la *SRAM* et les *ROM, EPROM* et *EEPROM* sont en net recul avec respectivement 1,5% et 3% de baisse. On peut donc supposer que les mémoires *Flash* et *DRAM*, moteurs de la croissance de l'industrie des mémoires, resteront sur une pente ascendante dans le futur proche [6].

X. RESONATEURS (MOSFET / SG-MOSFET)

L'application sans fil nécessite l'utilisation de résonateurs *MEMS* dans les domaines intermédiaires et *UHF* (de 30 MHz à 300 MHz et de 300 MHz à 3GHz). Pour atteindre ces fréquences, les résonateurs doivent être très rigides; Cela réduit le déplacement mécanique pour le même champ électrostatique appliqué. Les résonateurs à haute fréquence sont technologiquement réalisables. La limitation provient de la détection du déplacement du résonateur. La détection capacitive,

classiquement utilisée pour la mesure du mouvement, donne un courant capacitif lié à la capacité entre le résonateur et l'électrode. À la résonance, le déplacement induit une variation de capacité maximale, mesurée comme un pic du courant de mouvement. Pour les résonateurs à haute fréquence, avec un faible déplacement mécanique, la mesure de la capacité souffre des variations de faible capacité, qui peuvent finalement être inférieures au seuil de détection. Cette limitation pourrait néanmoins être dépassée, en principe, en utilisant l'architecture de détection *MOSFET*. Le résonateur est alors considéré comme une grille mobile résonnante sur le canal, la charge de canal modulant et, par conséquent, le courant de drain [2].

L'original « *résonant Gate Transistor (RGT)* » a été la première tentative d'utilisation de cette technique de détection pour le résonateur mécanique. Le dispositif était composé d'un cantilever en suspension métallique actionné par une électrode et utilisé comme grille mobile d'un transistor *MOSFET*. Sur la base du même principe, la géométrie compacte du résonateur a été développée pour optimiser les aspects d'actionnement et de détection et la rendre adaptée aux résonateurs à échelle. Les pièces d'actionnement et de détection sont ensuite combinées dans un seul appareil, comme le montre la (Fig 1.15), appelé *MOSFET Résonant Suspended-Gate (RSG-MOSFET)*. Une particularité du *RSG-MOSFET* est que la grille vibrante (mobile) module directement le potentiel de surface du canal *MOS* et la charge d'inversion subséquente. Les signaux *DC* et *AC* sont superposés à l'électrode à grille suspendue unique [2].

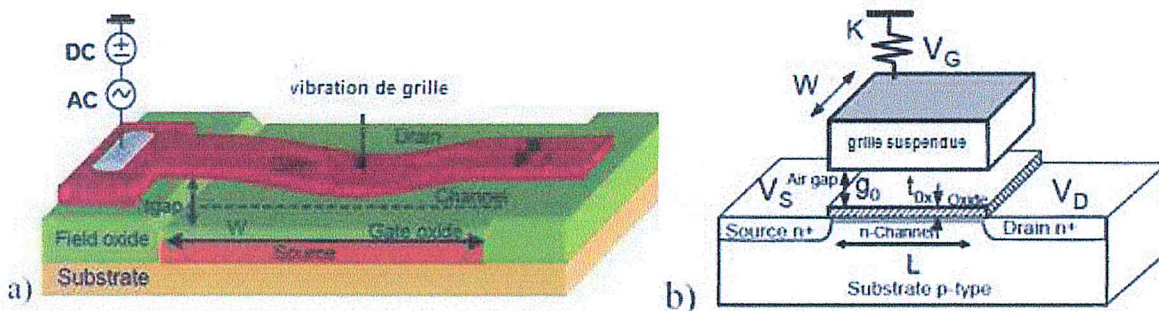


Figure (1.15) Schéma a) un résonant *SG-MOSFET* et b) section transversale du *SGMOSFET* [58]

- **Montage et description de la mesure**

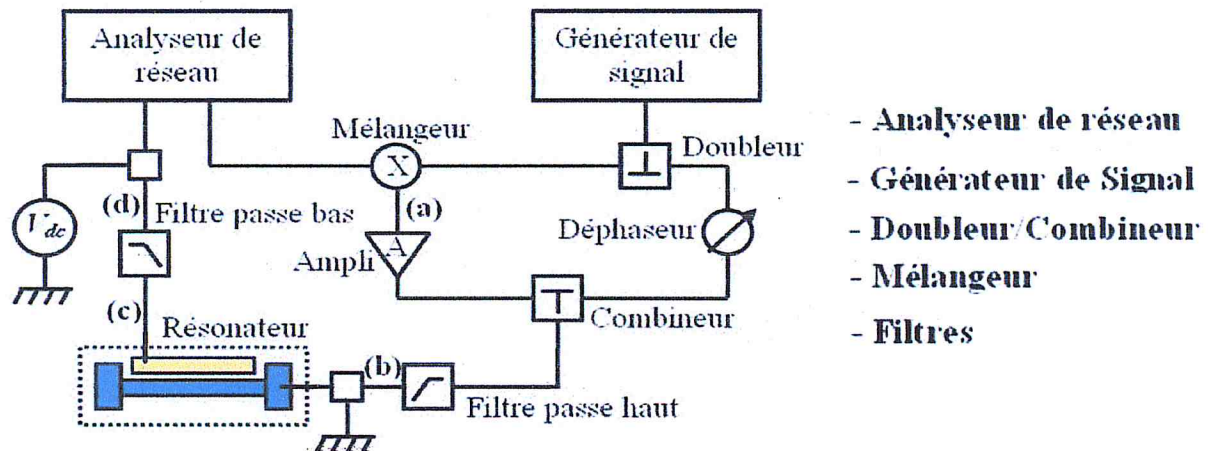


Figure (1.16) : Schéma de montage pour les caractérisations électriques en mixage fréquentiel sur les résonateurs à détection capacitive [59]

La (Figure 1.16) présente le schéma de mesure en mixage fréquentiel. Ce schéma est basé sur celui présenté dans [38]. Nous l'avons cependant adapté à la mesure de nos composants et au matériel de caractérisation disponible [43].

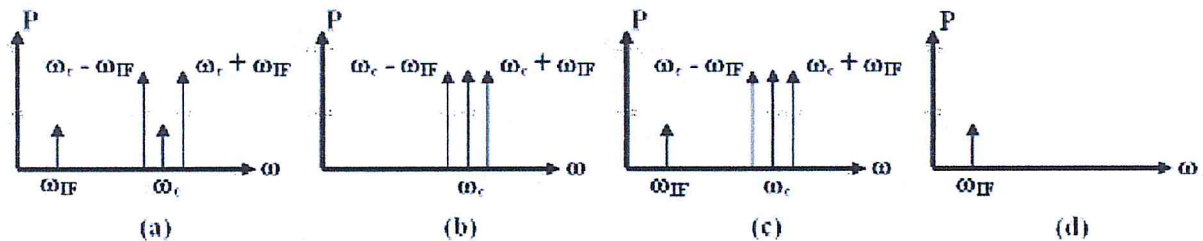


Figure (1.17) : Réponses fréquentielles des signaux en différents points du circuit [60]

La Figure (1.17) présente schématiquement les spectres en puissance des signaux dans le circuit de la Figure (1.16), en différents points. Le signal de la porteuse, noté ω_c , a été fixé à 800 MHz pour toutes les mesures. Cela correspond à une fréquence compatible avec les gammes de fonctionnement des autres composants du circuit (mélangeur, doubleur, amplificateur, combineur, filtre passe haut). Quant au signal de fréquence intermédiaire, noté ω_{IF} , il correspond à l'excitation du résonateur autour de sa fréquence de résonance. La seule limitation en termes de fréquence au niveau de ce signal est liée au filtre passe bas, qui présente une fréquence de coupure de 100 MHz [43].

La méthode de mesure :

- Nous commençons par dédoubler le signal de la porteuse, issu du générateur de signaux. Le but est de conserver une partie de ce signal pour pouvoir le réinjecter par la suite dans le circuit, afin d'ajuster le niveau de signal de la porteuse par rapport aux raies latérales. Notons la présence d'un déphaseur dans la branche dédoublée, afin d'ajuster la phase du signal dédoublé par

rapport à celle du signal principal. Nous nous plaçons alors dans une configuration d'excitation optimale pour le résonateur [43].

- Ensuite, le signal d'excitation, issu de l'analyseur de réseau, est mélangé avec le signal principal de la porteuse. Le spectre obtenu est alors celui de la (Figure 1.17) (a), sur lequel nous retrouvons le signal d'excitation à ω_{IF} , ainsi que le signal de la porteuse à ω_c . Notons l'apparition de deux raies latérales à $\omega_c - \omega_{IF}$ et $\omega_c + \omega_{IF}$, issues de la transposition du signal d'excitation autour de la porteuse [43].
- Puis, nous avons amplifié le signal en sortie du mélangeur, afin d'augmenter le niveau d'excitation du résonateur. Notons que lors de cette mesure, la tension de polarisation n'intervient pas pour l'excitation du résonateur. Il faut alors augmenter considérablement les niveaux de signaux pour que l'excitation du résonateur soit identique à celle présente dans le cadre de mesures classiques [43].
- Ensuite, nous avons combiné le signal sortant de l'amplificateur avec le signal issu du déphaseur. Nous avons alors filtré le signal obtenu à l'aide d'un filtre passe haut, dont la fréquence de coupure se situe à 400 MHz. Le signal obtenu est celui de la Figure (1.17) (b). Nous pouvons constater que le filtre a permis de couper la composante à ω_{IF} , l'idée étant de retirer cette composante du spectre pour qu'elle n'interfère pas sur la mesure du pic de résonance. Enfin, la combinaison des signaux a permis d'amplifier le signal de la porteuse, qui se trouve maintenant au même niveau que les raies latérales, permettant alors d'obtenir une excitation optimale pour le résonateur [43].
- Le signal traverse alors le résonateur. Les non-linéarités liées à la transduction capacitive vont mélanger le signal de la porteuse avec ceux des raies latérales, ce qui va créer une force électrostatique permettant d'exciter le résonateur. Ce dernier va générer le signal à ω_{IF} du fait de sa résonance mécanique, comme le montre le spectre de la Figure (1.18) (c) en sortie du résonateur [43].
- Enfin, le signal issu du résonateur traverse un filtre passe bas, présentant une fréquence de coupure de 100 MHz. L'objectif consiste à ne garder que la composante basse fréquence du signal et à couper le signal de la porteuse, ainsi que les raies latérales. La Figure (1.17) (d) montre qu'effectivement, seule la composante générée par le résonateur reste présente après filtrage [43].

Notons que nous avons ajouté des T de polarisation dans le circuit de la (Figure 1.16), afin de contrôler la polarisation du résonateur. Côté poutre, nous avons maintenu une polarisation nulle et côté électrode de détection, nous avons mis une polarisation égale à celle des mesures classiques. L'ajout de ces tensions sert à créer une différence de potentiel pour permettre la détection, mais aussi à fixer la même fréquence de résonance quel que soit le type de détection, puisque la poutre verra toujours la même tension de polarisation [43]

XI. CAPTEURS DE GAZ MOS :

Un concept prometteur de détection de gaz avec une grande performance et les matériaux de détection est la détection sera fait par transistors à effet de champ bien adaptés à la mesure des variations de potentielles. Les deux formes d'adsorption des molécules de gaz sur les solides, la chimisorption liée par des liaisons ioniques et la physisorption dirigée par les interactions de *Van Der Walls*, induisent une modification de la charge de surface et donc du potentiel de surface. L'effet est plus fort en cas de chimisorption par rapport à la physisorption, car un échange de charge se produit et les adsorbats sont dans un état chargé [39].

Cela conduit à une variation de la fonction de potentiel de surface [38]. Si la surface intérieure de la grille de transistor est accessible aux espèces de gaz, la variation de tension induit associé à la variation de fonction de travail agit comme une tension artificielle qui est ajoutée à une tension de grille appliquée de manière externe et affecte la conductance du canal de transistor [39].

Dans l'ensemble, deux *FET* différents ont été utilisés pour ce concept: *MOSFET* et *SG-FET*. Dans l'ancien concept, la couche sensible est le matériau de la grille elle-même. Pour ce dernier, la couche sensible au gaz est placée sur la surface intérieure de la grille suspendue à une certaine distance au-dessus du canal du transistor. Les deux concepts de transducteur sont illustrés dans la (figure 1.18). Historiquement, les capteurs de gaz *MOSFET* ont été introduits pour la première fois en 1975 [39]. Plus tard, les *SG-FET* ont été développés pour la détection des gaz [39].

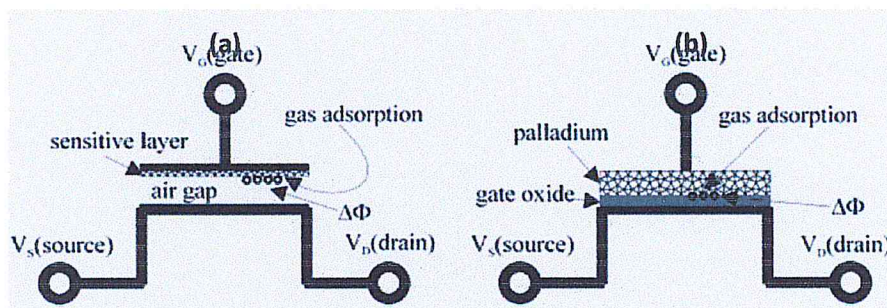


Figure (1.18) Vue schématique de a) un *SG-FET*, b) un *Pd-MOSFET*. [61]

En principe, toute adsorption de gaz entraîne une fonction de travail individuelle. Par conséquent, la mesure des changements de la fonction de travail peut être utilisée comme indicateur de la couverture superficielle des espèces de gaz qui frappent et de leurs concentrations correspondantes [39].

1 Capteurs de gaz *MOSFET*:

Les capteurs de gaz à base de *MOSFET*, également appelés *MOSFET* catalytiques sont basés sur un *MOSFET* conventionnel où un métal catalytique, tel que Pd, Pt ou Ir, est généralement utilisé comme couche mince (sous-100 nm) pour former l'électrode de grille [39].

Les capteurs de gaz à base de *MOSFET* fonctionnent habituellement à une température comprise entre 100 ° -200 ° c]. (Figure. 1.19) montre une structure en coupe transversale d'un capteur de gaz *MOSFET* à canal n [39].

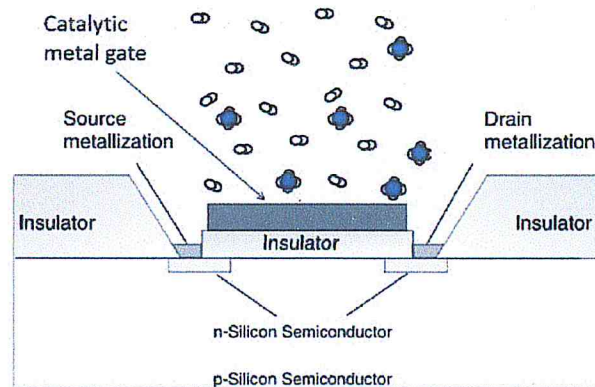


Figure (1.19) Schéma d'une structure de capteur de gaz *MOSFET* à canal n avec une électrode de grille métallique catalytique [62]

2 Capteurs de gaz SG-FET:

Le besoin d'une porte perméable pour les molécules de gaz cible a été une limitation difficile des gaz éventuellement détectés pour les *MOSFET* de *Lundström*. En plus d'une gamme limitée de gaz cible, la température de fonctionnement élevée requise (supérieure à 100 ° C) est l'une des principales limitations de ce type de capteur [39].

Un autre concept de détection de gaz prometteur via des dispositifs *FET* est l'utilisation de *SG-FET* comme transducteur. En principe, ces dispositifs peuvent être utilisés pour la détection d'une large gamme d'espèces de gaz et offrent une réelle flexibilité dans l'intégration de la couche sensible. Comme le montre la (figure 1.20), les *SG-FET* sont similaires aux *MOSFET*, mais ont un entrefer entre le diélectrique de porte et l'électrode de grille. Sur la surface intérieure de la grille suspendue, une couche sensible au gaz est déposée. Les molécules de gaz cible se diffusent à travers l'entrefer et adsorbent à la surface de la couche sensible. Comme expliqué précédemment, cela induit un changement de fonction de travail de l'ayer sensible. Le changement de potentiel est ajouté à la tension de grille appliquée V_g et par conséquent, la courbe $I_d - V_g$ est décalée. La hauteur de l'entrefer doit être d'au moins 1 μm , afin de maintenir la diffusion de gaz sur la couche sensible suffisamment [40].

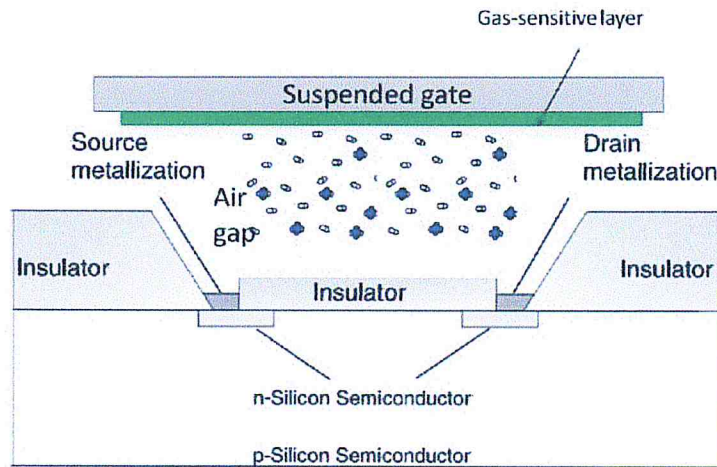


Figure (1.20) Schéma du capteur de gaz SG-FET à canal n [63]

Les principaux avantages des capteurs de gaz SG-FET sont la température ambiante (RT) ou légèrement plus haut et un large choix de matériaux sensibles. Le matériau sensible doit être conducteur ou très mince. Une large gamme de matériaux sensibles a été démontrée en combinaison avec SG-FET tels que: Pt [41], Ir oxide [42], etc)

3 Couche sélective pour gaz cible

Le tableau [38], montre quelques exemples de matériaux sensibles déployés dans un SG-FET Capteur de gaz :

H ₂	Palladium	CO, NO ₂ ,	Tin dioxide
NH ₃	Titanium nitride	H ₂ S	Silver oxide
NO, NO ₂	Copper-phthalocyanine	NH ₃	Titanium nitride
CO ₂	Polysiloxanes	NO ₂ , NH ₃	Cobalt oxide
		C ₂ H ₅ OH	Germanium

Tableau 1 : les combinaisons connues d'espèces de gaz détectables et de matières sensibles [64]

XII. CONCLUSION

L'objectif de ce premier chapitre était pour rappeler les principales caractéristiques et le mode de fonctionnement des différentes structures des transistors *mos* (type n et type p), et comment appliquée ces transistors dans les mémoires à semiconducteurs et les résonateurs a détection capacitif et même un capteur de gaz après avoir présentée la technologie de la micro fabrication. Dans les chapitres qui suivent, nous allons nous focaliser sur la dérivé de transistor mos sont (SG-MOSFET)

CHAPITRE 2

SG-MOSFET

I. INTRODUCTION

Les micros capteurs et les micros actionneur dans le domaine *MEMS* ont utilisé une variété de mécanismes de transduction tels que piézorésistive, capacitif et d'autres mécanismes [9]. Chaque mécanisme de transduction présente ses propres avantages qui rendent apte pour une application donnée et des exigences telles que le faible coût, le grand volume, la haute sensibilité, la grande plage de réponse. Certains des mécanismes de transduction comportent un mouvement mécanique. Habituellement, le mouvement mécanique est converti en un signal électrique en mesurant les changements dans les éléments passifs tels que la capacitance, la résistance ou le couplage inductif mutuel. Dans cette approche la détection et différentielle actionnement est poursuivie directement le mouvement mécanique avec un dispositif électrique actif par exemple (*MOSFET* à grille mobile) [8].

Le concept de *MOSFET* de grille mobile comme élément de détection n'est pas nouveau, la grille est libre de se déplacer Au-dessus du canal entre la source et les régions de drain [10]. Le champ, résultant de la tension de grille ou de la position de grille par rapport au substrat, Le champ électrique, résultant du mouvement de la grille par rapport au substrat, module la densité de charge du canal et donc la conductivité du canal sous la grille [8]

Les premiers à décrire un transistor d'effet de champ de grille mobile est appelé transistor à grille résonnante (*RGT*) en 1967 [10]. En tant que composant de détection, le courant de drain est modulé par le mouvement d'une grille suspendue. La grille elle se déplace selon une direction verticale perpendiculaire au plan du substrat. Dans leur étude, Les opérations mécaniques et électriques de la *RGT* ont été analysées avec une simple grille mobile vibrante en or dans la gamme de fréquences de 1 à 100 kHz. La (figure 2.1 (a)) montre la géométrie et les connexions de circuit pour le *MOSFET* à grille mobile verticalement. Les vibrations perpendiculaire à la surface du substrat et sont détectées par variation des charges induites dans un canal *MOSFET*. Une modélisation et proposé une application d'accéléromètre basée sur une couche de film mince de polysilicium au lieu d'un métal comme matériau de grille [11].

Des progrès dans la technologie *MEMS* ont ouvert la fabrication de microstructures qui utilisent des techniques de micromachine en volume ou de surface, qui ont de nouveau généré un nouvel avantage pour les *MOSFET* à grille mobile. Différent du mouvement de la grille mobile, Le fonctionnement schématique de ce dernier dispositif est illustré sur la (figure 2.1 (b)). En 1997 la fabrication d'un FET à grille mobile avec technologie de micromachine de surface pour une application d'accéléromètre [12]. La masse de l'accéléromètre jouer le rôle de la grille du transistor, en changeant la valeur de la tension de seuil avec l'accélération. En 2000, l'utilisation le courant de drain et la tension de seuil d'un *MOSFET* comme sortie de détection d'un accéléromètre fabriqué avec micromachine en volume [13]. Il avait un entrefer comme isolant entre la grille métallique fixée sur une plaque de verre de couverture et la grille flottante à base de polysilicium d'un *MOSFET* à canal

n intégré dans une masse anti-silicium. Donc, le substrat contenant le canal se déplace vers le haut et vers le bas en changeant l'entrefer alors que la grille reste fixe [8].

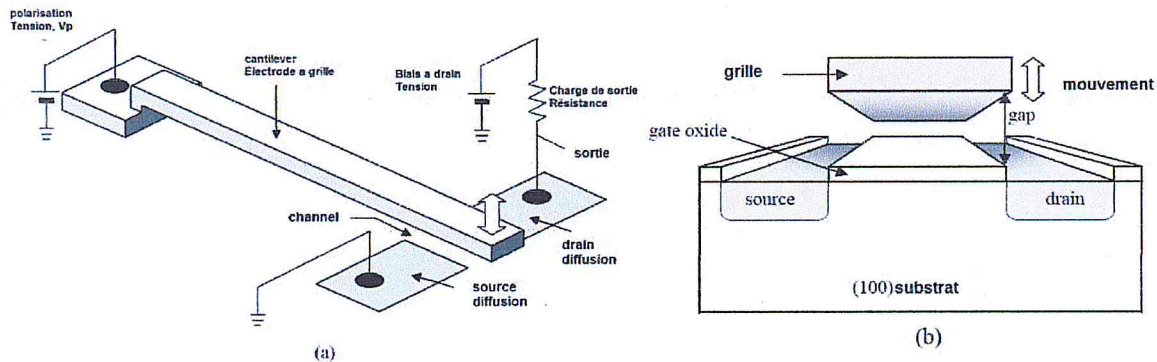


Figure (2.1) une vue schématique du *FET* a grille mobile verticalement. (a) Une géométrie pratique et des connexions de circuit. (B) Vue schématique du mouvement d'un *FET* a grille mobile verticalement [65]

Les *FET* à grille mobiles ont été appliquée comme des capteurs de pression dont laquelle les grilles sont déviées par la pression appliquée. En 1999, il son montré une structure *FET* a grille mobile comme interrupteur de pression [14]. Il a utilisé le diaphragme de polysilicium dopé au bore comme matériau de grille. La structure de grille forme une cavité sous vide et la source et drain intégrés sur le substrat de silicium. La grille est comme une membrane en polysilicium se déplace de manière semblable à celle du piston par rapport au substrat. Le concept opérationnel est que sous pression ambiante, l'intensité du champ électrique sur le transistor n'est pas suffisante pour allumer le transistor en raison d'un grand écart entre la grille et le canal. Lorsque la pression externe atteint une valeur de seuil, la plaque de grille est tirée suffisamment vers le substrat. Lorsque la porte se rapproche du substrat, le transistor est conduit. Le commutateur est effectivement fermé. Ceci est réalisé sans arc. Les dispositifs fabriqués fonctionnent comme des pressostats pour des valeurs de pression variant dans la plage de 12 psi à 500 psi [8].

Les *FET* à grille mobiles ont également été étudiés pour d'autres applications. Le capteur de contrainte micromécanique utilisant une grille poly-Si en forme de poutre flottant au-dessus d'un canal *FET* a été rapporté [15]. La variation de la fréquence de résonance de la grille ancrée à deux extrémités en fonction de la contrainte appliquée est mesurée par les changements actuels du *FET*. Les fréquences de résonance de la structure sont testées en fonction de la souche. Le signal de sortie est surveillé par un analyseur de spectre pendant l'expérience. Les résultats des tests montrent une bonne linéarité et une grande sensibilité. En 1991 a rapporté un microphone fabriqué par une membrane Si_3N_4 revêtue d'aluminium agissant comme grille mobile sur un *FET* avec une réponse en douceur jusqu'à 30 kHz. En 2001, A rapporté un transistor à double grille résonnant (*RDGT*) [16] qui, en plus d'une grille oscillante, possède également une grille flottante fixe. La grille flottante fixe peut être utilisée pour appliquer une tension de grille indépendante de la

polarisation appliquée à la grille oscillante. La grille mobile supportée par des barres de torsion est actionnée avec une force électrostatique. Le déplacement de la grille changera de capacité entre la grille mobile et la grille fixe, ce qui entraînera une variation du courant de drain [8].

Tout ce qui cité précédemment les travaux précédents implique un mouvement relatif de la grille par rapport à la substrat (source et au drain) dans la direction verticale. Dans un *MOSFET* typique, la grille elle a un contrôle important sur la conductivité du canal pour des distances d'entrefer environ $1 \mu\text{m}$. Cela limite le mouvement vertical dans ces dispositifs à environ $1 \mu\text{m}$ [8].

II. PRNcipe DE FONCTIONNEMENT D'UN TRANSISTORS SG-MOFET

La structure 3-D, la section transversale 2-D, le circuit de condensateur équivalent et le symbole du *SG-MOSFET* à canal n sont représentés sur la (figure 2.2). Les paramètres dimensionnels sont définis comme suit: L est la longueur du canal *SGFET*, h est l'épaisseur du pont suspendu (*SG*), t_{ox} est l'épaisseur de l'oxyde, t_{gap0} est le vide entre le pont et l'oxyde et W est la largeur du canal *SG-MOSFET* Qui peut être supposé égal à la longueur du pont suspendu si $W < T_{gap0}$; La largeur du pont est égale à la longueur du canal L .

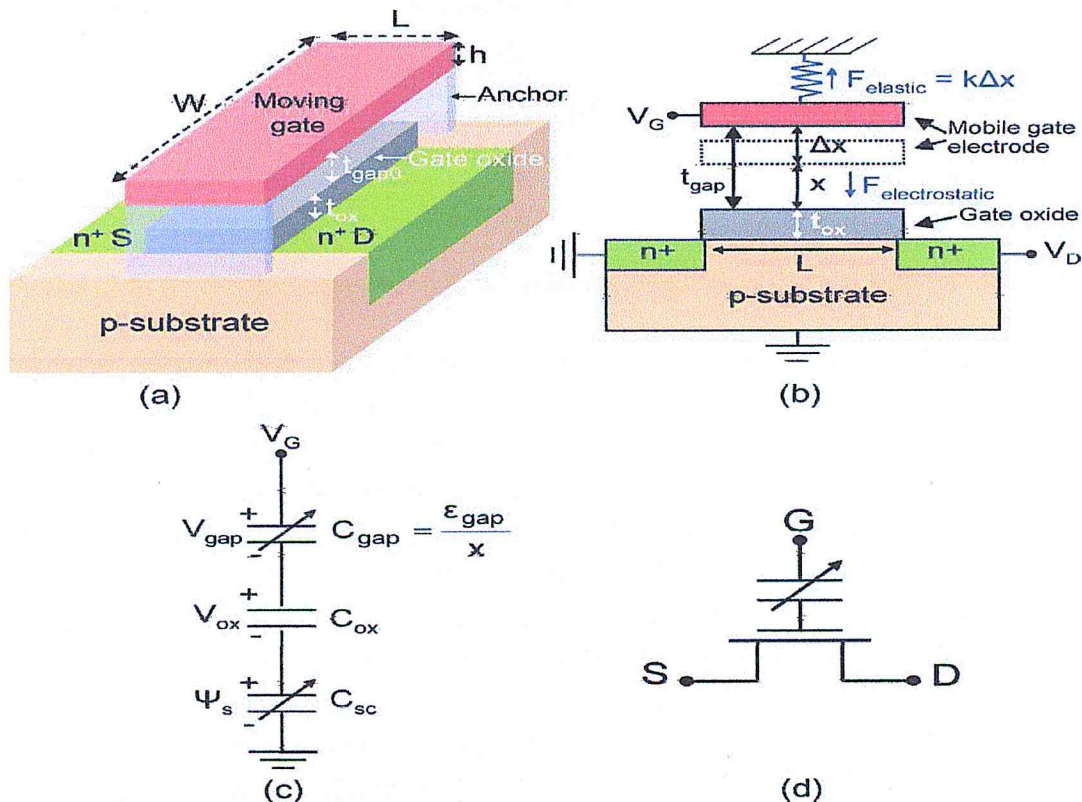


Figure (2.2). *SGFET* N-Channel. (a) Structure 3D. (b) Section transversale parallèle à la longueur de l'appareil. (c) Circuit de condensateur équivalent. (d) Symbole [66]

Un *SG-MOSFET* combine d'un commutateur *MEMS* actionné électrostatiquement et un *MOSFET*. Il se distingue d'un *MOSFET* régulier par la présence d'un entrefer entre l'électrode de grille doublement serrée et l'oxyde de grille. La

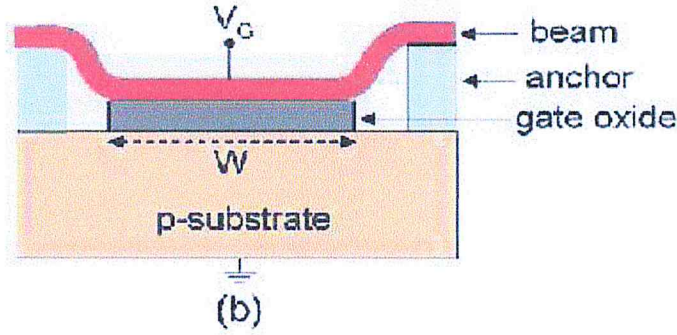


Figure (2.3) b : Section transversal grille vers le bas ($V_G \geq V_{pi}$, $x = 0$). [68]

III. MODELISATION ANALYTIQUE

1. Pull in

L'équation de la force-balance liée à la grille suspendue

$$\frac{WL\epsilon_{gap}V_{gap}^2}{2x^2} = k(t_{gap0} - x) \quad (1)$$

Le côté gauche de (1) désigne la force d'attraction électrostatique appliquée au SG (grille suspendue), tandis que le côté droit désigne la force élastique antagoniste (Figure 2.2 (b)). ϵ_{gap} est la permittivité des espaces, et V_{gap} est la chute de tension. La force élastique est représentée par une constante de ressort linéaire k . Il s'agit d'une hypothèse simplifiée puisque la composante d'étirement non linéaire de la constante de ressort, qui peut conduire à une force de restauration non négligeable (peut modifier le comportement du *pull out* [22]), est négligée. Dans (1), l'attraction de *van der Waals* entre le SG et le substrat n'est pas prise en compte. Cependant, il convient de mentionner que l'impact des forces *van der Waals* sur les caractéristiques SG-MOSFET devient non négligeable si l'entrefer est extrêmement évolué: par exemple, pour $t_{gap0} \leq 2$ nm et $V_{gap} = 1$ V, Les forces de *van der Waals* théoriquement dans ce cas est plus grand que la force électrostatique [17].

V_{gap} est exprimé en fonction de l'épaisseur réelle et V_G dépendante de la densité de charge du semiconducteur Q_{sc}

$$V_{gap} = \frac{Q_{sc}}{\epsilon_{gap}/x} \quad (2)$$

Tant que le dénominateur de (2) montre la capacité de l'épaisseur réelle par unité de surface, C_{gap} (Figure 2.2 (c)). La substitution de (2) en (1) produit [17].

$$x = t_{gap0} - \frac{WL}{2\epsilon_{gap}k} \quad (3)$$

Notez que le deuxième terme sur le côté droit de (3) correspond au déplacement de la grille Δx (Figure 2.2 (b)). L'équation (3) est valable pour $x > X_{pi}$. Au-delà de cette limite, le système n'est plus en équilibre, et la grille s'arrête jusqu'à l'oxyde, ce qui conduit à $x = 0$ [17].

Pour une force électrostatique uniformément répartie le long du pont et négligeant la contrainte résiduelle, la constante de ressort k est donnée en termes de paramètres structurels par [23]

$$k = \frac{32ELh^3}{W^3} \quad (4)$$

Dans un interrupteur *MEMS* simple, composé de deux plaques métalliques parallèles séparées par un entrefer, l'analyse de stabilité donne $X_{pi} = 2 t_{gap0} / 3$ [17]. Lorsqu'une seconde capacité C_f est connectée en série avec C_{gap} , X_{pi} est réduit à

$$x_{pi} = \frac{2 - C_{gap0}/C_f}{3} t_{gap0} \quad (5)$$

Où $C_{gap0} = \epsilon_{gap} / t_{gap0}$ est la capacité de l'épaisseur minimum. C_f induit une rétroaction négative sur V_{gap} et utilisé pour augmenter la plage de déplacement de l'électrode mobile dans les interrupteurs *MEMS*. Dans (5) que, pour $C_{gap0} / C_f \geq 2$, (c.-à-d. *pull in*) [24]. Dans le cas du *SG-MOSFET*, C_f est égal à l'équivalent de C_{ox} avec C_{sc} en série (Figure 2.2 (c)) [17].

Les relations simples pour la tension du *pull in* V_{pi} , la position *SG* au *pull in*, X_{pi} et le potentiel de surface au *pull in* (Ψ_{pi}) sont obtenues à partir de l'approximation de l'appauvrissement. Comme notre but ultime est d'utiliser le *SG-MOSFET* dans les circuits logiques. En profitant de la forte transition on-off, nous sommes naturellement intéressés par le cas où le *pull in* (et donc l'extraire) se produit avant la formation du canal d'inversion (cela implique que $\Psi_{pi} < 2\Phi_F$, où Φ_F est le Potentiel de substrat *Fermi*). Par conséquent, en ce qui concerne notre objectif, l'approximation de l'appauvrissement ne conduit pas à une limitation [17].

Bien que les *SG-MOSFET* Peut être conçu de telle sorte que la grille soit tiré dans la zone d'inversion forte (voir, par exemple, les caractéristiques de tension de courant dans [21]), ce cas exacerbe les effets de canal court du fait du faible Couplage de grille à canal dans l'état OFF [25] Et, par conséquent, ne sera pas considéré ici. En revanche, l'apparition de l'intrusion dans une inversion faible permet de supprimer les effets de canal court puisque la tension de seuil et le basculement du sous-seuil sont déterminés par la traction mécanique de la grille. Comme on le verra dans la section suivante, la commutation d'inversion faible permet au *SG-MOSFET* d'éliminer la région de sous-seuil habituelle, où la pente de la caractéristique courant-tension est finie et de réduire la tension de seuil sans augmenter le courant hors tension. En utilisant l'approximation de l'appauvrissement [17], la charge d'épuisement est donnée en fonction du potentiel de surface par :

$$Q_d(\Psi_S) = -\sqrt{2\varepsilon_{Si}qN_A\Psi_S} \quad (6)$$

Où ε_{Si} est la permittivité du silicium, q est la charge élémentaire, N_A est le dopage du substrat.

En remplaçant (6) dans (3) pour Q_{sc} , la position de grille est exprimée en fonction du potentiel de surface

$$x(\Psi_S) = t_{gap0} - \frac{WL\varepsilon_{Si}qN_A}{\varepsilon_{gap0}k} \Psi_S \quad (7)$$

Selon (7), tant que le substrat est en épauement, la position de grille est une fonction linéaire du potentiel de surface. La position limite de la grille au *pull in* (X_{pi}) est écrite en termes de potentiel de surface limite du *pull in* (Ψ_{pi}) en utilisant (5) et en exprimant C_f comme une combinaison en série de la capacité d'oxyde C_{ox} et de la capacitance semiconductrice C_{sc} (En appauvrissement, $C_{sc} = \varepsilon_{Si} / X_{di}$, où X_{di} est la profondeur d'épauement à $\Psi_s = \Psi_{pi}$) [17].

$$x_{Pi} = \frac{2 - (\alpha + \beta\sqrt{\Psi_S})}{3} t_{gap0} \quad (8)$$

Ou

$$\alpha = \frac{C_{gap0}}{C_{OX}} \quad (9a)$$

$$\beta = C_{gap0} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_{Si}qN_A}} \quad (9b)$$

Le potentiel de surface à l'étirement est exprimé en remplaçant Ψ_s par Ψ_{pi} et X par l'expression de X_{pi} (donnée par (8)) dans (7), et la résolution de l'équation quadratique résultante pour Ψ_{pi} [17]

$$\Psi_{Pi} = \frac{\xi + \beta\sqrt{2\xi - \beta^2}}{2X^2} \quad (10)$$

Ou

$$X \equiv \frac{3WL\varepsilon_{Si}qN_A}{t_{gap0} \varepsilon_{gap0}k} \quad (11a)$$

$$\xi \equiv 2(1 + \alpha)x + \beta^2 \quad (11b)$$

L'équation (10) est la plus grande des deux racines de l'équation quadratique, qui fournit un X_{pi} précis. Les équations (8) et (10) sont les relations exprimant X_{pi} et

Ψ_{pi} , respectivement, en termes de paramètres structurels [17], et elles sont valables pour $0 \leq \Psi_{pi} < 2\Phi_F$.

La tension du *pull in* est définie comme la tension de grille conduisant à $\Psi_s = \Psi_{pi}$. Du circuit diviseur de condensateur équivalent (Figure 2.2 (c)), la tension de grille effective peut être exprimée comme la somme de la tension (V_{gap}), l'oxyde de grille (V_{ox}) et sur le semiconducteur (Ψ_s) [17].

$$V_G(\Psi_S) = V_{FG} - \frac{Q_{sc}(\Psi_S)x(\Psi_S)}{\epsilon_{gap}} - \frac{Q_{sc}(\Psi_S)}{C_{OX}} + \Psi_S \quad (12)$$

Où V_{FB} est la tension à bande plate liée à la différence de fonction de travail et à la densité de charge d'oxyde. En remplaçant $x(\Psi_s)$ par X_{pi} , $Q_{sc}(\Psi_s)$ par $Q_d(\Psi_{pi})$, et Ψ_s par Ψ_{pi} in (12) [17], le *pull in*

$$V_{Pi} = V_{FB} + \bar{\gamma}\sqrt{\Psi_{Pi}} + \Psi_{Pi} \quad (13)$$

Ou

$$\bar{\gamma} \equiv \gamma \left(1 + \frac{C_{OX}}{\epsilon_{gap}/x_{Pi}} \right) \quad (14)$$

Et $\gamma = \frac{\sqrt{2\epsilon_{Si}qNA}}{C_{ox}}$ est le coefficient d'effet du corps de *MOSFET*. Le terme entre parenthèses dans (14) correspond à l'augmentation de capacité une fois que la grille est tirée [17].

L'équation (13) est une relation générale pour V_{pi} . Il réduit à la tension du *pull in* bien connue du simple interrupteur *MEMS* [26], $V_{pi(sw)}$, pour $N_A \rightarrow \infty$ (Cas d'électrode métallique menant à $\Psi_{pi} \rightarrow 0$ et $x_{pi} \rightarrow (2 - \alpha) t_{gap0} / 3$) Et $V_{FB} \rightarrow 0$ (même matériau pour les deux électrodes) [17].

$V_{pi(SG-MOSFET)}$. La tension du *pull in* pour un *MOSFET* à grille suspendue est comme suit:

$$\lim_{\substack{N_A \rightarrow \infty \\ V_{FB} \rightarrow 0}} V_{Pi(SG-FET)} = V_{Pi(SW)} = \sqrt{\frac{8k(t_{gap0} + t_{OX}/\epsilon_r)^3}{27\epsilon_{gap}WL}} \quad (15)$$

Dans (15), ϵ_r est le constant diélectrique du matériau d'oxyde de grille [17].

2. Pull out

Dans cette section, nous présentons une relation simple pour la tension de retrait *SG-MOSFET*, à partir des forces agissant sur la porte pendant que la grille est tirée. Nous prenons en compte la force élastique de restauration et les forces électrostatiques et d'adhérence opposées [17].

Dans le *SG-MOSFET*, une fois que la grille est tirée, la capacité de la grille augmente brusquement, de même que le potentiel de surface et la densité de charge. L'augmentation abrupte de la densité de charge s'explique également par la réduction abrupte de la tension de seuil. Pour $V_G > V_{pi}$, le *SG-MOSFET* se comporte comme un *MOSFET* conventionnel. Lorsque V_G est balayé d'une valeur plus grande que la tension du *pull in*, Retirer ne se produit pas à $V_G = V_{pi}$ car le potentiel de surface est supérieur à Ψ_{pi} . Cela conduit à une densité de charge plus élevée et, à une force électrostatique supérieure à celles du début de du *pull in* (alors que $x = X_{pi}$). La libération de la grille est également retardée (si elle n'est pas complètement empêchée) par les forces d'adhérence de la surface [27]. Par conséquent, V_G devrait être réduit à $V_{po} < V_{pi}$ afin de se retirer [17].

L'équation de la force-balance dans cette état de la grille, juste avant le retrait [17], peut être approximée dans le premier ordre comme

$$\frac{WL\epsilon_{OX}V_{OX}^2}{2t_{OX}^2} + F_a = kt_{gap0} \quad (16)$$

Où le premier terme sur le côté gauche représente la force électrostatique appliquée à la grille, alors que le terme à droite montre la force de rappel élastique du pont doublement encartée. F_a est la force d'adhérence de la surface. En (16), nous avons supposé que la constante de ressort est donnée par (4) même après que la grille est tirée (Figure2.3(b)). La force élastique de restauration peut être calculée plus précisément en tenant compte de l'influence de la composante d'étirage non linéaire sur la constante de ressort [28][17].

En outre, nous avons négligé le décollage de la grille lorsque V_G est balayé vers V_{po} , et nous avons supposé que la grille reste en contact avec la zone d'oxyde de grille entière jusqu'à l'apparition du retrait [17].

En l'absence de forces capillaires et de petites valeurs de rugosité, les interactions adhésives sont dominées par les forces attrayantes de *van der Waals* entre les surfaces sans contact plutôt que par les zones qui sont effectivement en contact [29]. En raison de la rugosité de la surface, qui empêche le contact intime des surfaces *MEMS* sec, les énergies d'adhérence sont très faibles, généralement en microjoules par mètre carré [29]. Lorsque la grille est dans l'état bas, F_a peut être exprimé comme

$$F_a \cong 2WL \frac{\Gamma}{D_0} \quad (17)$$

Où Γ est l'énergie d'adhérence interrassiale par unité de surface [34]. D_0 est un décalage correspondant à l'approche la plus proche des deux surfaces et est déterminé par la rugosité de surface moyenne [34] [17].

Pour $V_G = V_{po}$, l'approximation de l'appauvrissement conduit à $V_{ox} \big|_{V_G=V_{po}} = \gamma \sqrt{\Psi_{po}}$.
Où Ψ_{po} est le potentiel de surface au extraire De (16) et (17) [17], ou Ψ_{po} est donné par

$$\Psi_{po} = \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_{Si} q N_A} \left(\frac{kt_{gap0}}{WL} - \frac{2\Gamma}{D_0} \right) \quad (18)$$

Dans le cas $\Psi_{po} > 0$ pour un *SG-MOSFET* n-canal, condition

$$F_a < kt_{gap0} \quad (19)$$

La grille doit être ne colle pas au substrat. En d'autres termes, en l'absence de la force électrostatique (à l'état band plat), la force de rappel doit être suffisamment grande pour surmonter la force d'adhérence de la surface [17].

La tension du *pull out* est donnée comme la somme de la tension à bande plate, la chute de tension sur l'oxyde de grille et le potentiel de surface à retirer [17].

$$V_{po} = V_{FB} + \gamma + \Psi_{po} \quad (20)$$

L'équation (20) se présente comme une expression générale : elle réduit l'équation d'extraction du interrupteur *MEMS* simple avec une couche diélectrique [25] pour $N_A \rightarrow \infty$, $V_{FB} \rightarrow 0$ et $\Gamma \rightarrow 0$ [17].

$$\lim_{\substack{N_A \rightarrow \infty \\ V_{FB} \rightarrow 0 \\ \Gamma \rightarrow 0}} V_{po(SG-FET)} = V_{po(SW)} = \sqrt{\frac{2kt_{gap0}t_{ox}^2}{\epsilon_{ox}WL}} \quad (21)$$

Il convient de mentionner que, outre les forces d'adhérence de la surface, la fenêtre d'hystérésis peut également être agrandie par la charge de la surface de l'oxyde, dont la densité dépend de la position de la grille (tirée ou retirée). En effet, cette propriété est exploitée dans [31] pour construire une cellule de mémoire sans condensateur. Cependant, on montre expérimentalement que ce cas est principalement significatif lorsque l'oxyde de grille est dégradé, par exemple, par un procédé au plasma d'oxygène qui induit des pièges sur la surface d'oxyde [20]. Les architectures de mémoire de plus en plus avancées dans futures sont susceptibles d'utiliser des couches de stockage minces contrôlées dans le diélectrique de la grille au lieu de l'oxyde de couches minces nanocristallines ou ferroélectriques peuvent être conçus pour obtenir un stockage d'informations dans des dispositifs *SG-MOSFET* avec des tensions de fonctionnement relativement faibles (<5-10 V) [32] [17].

IV. POSITION SG-MOSFET EN FONCTION DE LA TENSION DE LA GRILLE

Pour obtenir une relation entre la position de grille et la tension de grille, (3) et (12) doivent être résolus ensemble. Cependant, la relation résultant de ces équations implique un polynôme de troisième degré et ne fournit pas une solution simple pour $X(V_G)$ et $\Psi_s(V_G)$, même lorsque l'approximation de l'appauvrissement est utilisée [17].

Pour obtenir une expression simple mais raisonnablement précise pour $X(V_G)$ donnant $X = t_{gap0}$ pour $V_G = V_{FB}$ et $x = X_{pi}$ à $V_G = V_{pi}$, on impose d'abord $X(\Psi_s) = X_{pi}$ dans (12) et résout l'équation quadratique résultante Pour Ψ_s alors que $Q_{sc} = Q_d$: [17]

$$\Psi_{S,up} = \left(\frac{\bar{\gamma}}{2} - \sqrt{V_G - V_{FB} + \frac{\bar{\gamma}^2}{4}} \right)^2 \quad (22)$$

Équation (22) est valide lorsque la grille est dans l'état supérieur et $V_G \leq V_{pi}$. Lorsque la grille est abaissée et que $V_G \geq V_{po}$, Ψ_s est donné par la relation MOSFET habituelle [33] obtenue en imposant $Q_{sc} = Q_d$ et $X = 0$ dans (12) en remplaçant $\bar{\gamma}$ en (22) par γ : [17]

$$\Psi_{s,MOS} = \left(\frac{\gamma}{2} - \sqrt{V_G - V_{FB} + \frac{\gamma^2}{4}} \right)^2 \quad (23)$$

Encore une fois, les équations quadratiques fournissant (22) et (23) permettent également une deuxième racine en tant que solution, qui est rejetée car elle ne correspond pas à la situation physique. Les équations (22) et (23) sont comparées à la solution itérative de (3) et (12) dans la (Figure 2.4 (a)). Dans la solution itérative, on utilise l'équation de charge exacte [33] y compris les accepteurs, les trous et les électrons. Naturellement, Ψ_s, MOS est en très bon accord avec la solution numérique pour $\Psi_{po} < \Psi_s < 2\Phi_F$ ci-dessus, dont l'approximation de l'appauvrissement perd sa validité. Ψ_s, up est également en accord avec la solution itérative, en particulier pour les valeurs V_G proches de V_{pi} et V_{FB} (puisque, pour $V_G \approx V_{FB}$, $Q_{sc} \approx 0$, et la sensibilité à X est très faible). Le léger écart entre la solution exacte et (22) pour la gamme de tension de grille $V_{FB} < V_G < V_{pi}$ est d'une importance mineure car, dans la caractéristique courant-tension, cette gamme de tension de grille correspond au bas de la région sous-seuil avec très faible valeur de courant de drain [17].

L'expression pour $X(V_G)$ est obtenue en remplaçant (22) en (3) par Ψ_s [17]

Ou $Q_{sc} = Q_d$:

$$x(V_G) = t_{gap0} - \frac{WL \varepsilon_{Si} q N_A}{\varepsilon_{gap} k} \left(\frac{\bar{y}}{2} - \sqrt{V_G - V_{FB} + \frac{\bar{y}^2}{4}} \right)^2 \quad (24)$$

L'équation (24), qui est valable pour $X_{pi} \leq X(V_G) \leq t_{gap0}$, est comparée à la solution itérative de la (Figure 2.4(b)). Les deux modèles reproduisent la même tendance ; Cependant, (24) sous-estime la hauteur d'écart pour les valeurs intermédiaires Δx en raison de l'approximation réalisée en (22). D'autre part, la différence entre les solutions approximatives et exactes pour V_{pi} et V_{po} dans la (Figure 2.4(a)) et (b) provient de l'approximation de l'appauvrissement et est négligeable ($\sim kT / q$). Notez que V_{FB} est supposé égal à zéro dans cet exemple particulier [17], ce qui conduit à $\Psi_s = 0$ dans la (Figure 4.2 (a)) et $X(V_G) / t_{gap0} = 1$ dans la (Figure 2.4 (b)) pour $V_G = 0$ [17].

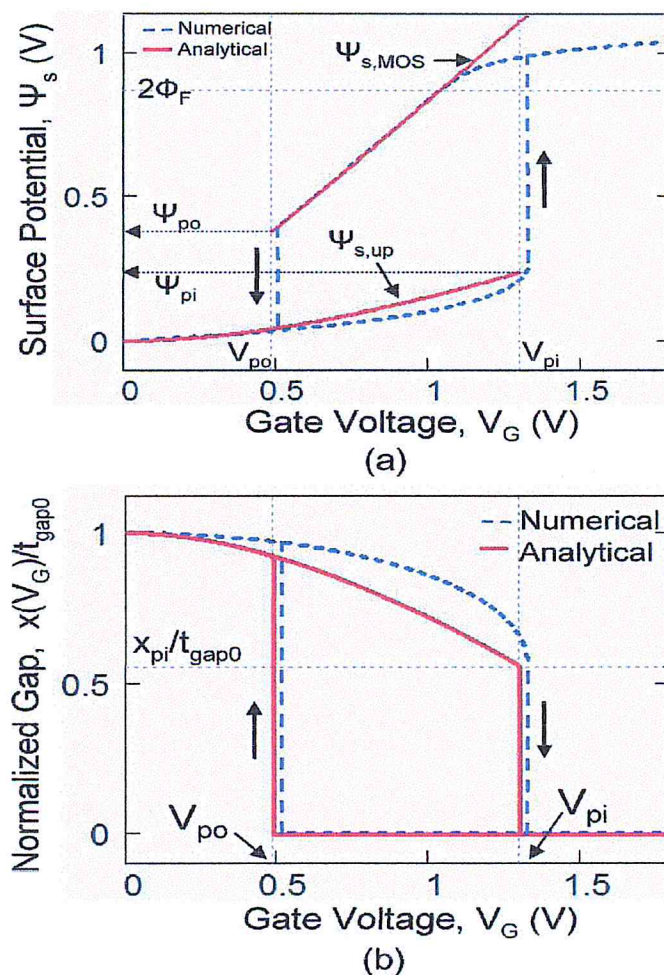


Figure (2.4) Modèle exact (numérique) par rapport au modèle analytique. (A) Variation du potentiel de surface en fonction de la tension de grille. (B) Variation de l'épaisseur d'espace normalisée en fonction de la tension de grille. $W = 650$ nm, $L = 100$ nm, $h = 10$ nm, $E = 170$ GPa (Si) ($k = 2$ N / m), $t_{gap0} = 10$ nm, $t_{ox} = 2$ nm (SiO₂), $N_A = 3.1017$ cm⁻³, $V_{FB} = 0$, $\Gamma = 25$ μ J / m² et $D_0 = 0,2$ nm. Le modèle numérique se réfère aux solutions itératives de (3) et (12) et utilise l'équation de charge exacte avec des accepteurs, des trous et des électrons.[69]

V. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les caractéristiques statiques *SG-FET* et les critères de conception. Des formules de base pour les tensions du *pull in* et du *pull out* ont été fournies, et la position *SG* est explicitement exprimée en termes de tension de grille. En utilisant le modèle, les principaux paramètres du périphérique ont été mis en évidence, une amélioration considérable du rapport I_{on} / I_{off} dans les *SGFET* est démontrée les conditions d'une opération à basse tension. L'analyse de fonctionnement et de performance de *SG-FET* complémentaire basé sur le modèle analytique développé à la fonctionnalité améliorée par rapport au *CMOS* classique.

CHAPITRE 3

Modélisation et simulation multiphysique

I. INTRODUCTION

Dans les dispositifs à semiconducteurs *Micro-Electro-Mechanical systems (MEMS)*, le (*SG-FET*) est un dispositif important pour des applications diverses. La méthodologie *FET* de grille suspendue est implémentée pour les différents dispositifs micromécaniques, capteurs de gaz, microphones et résonateurs comme le gyroscope pour une sensibilité élevée. Dans la conception et l'optimisation de tels dispositifs, la méthodologie *SG-FET* nécessite une simulation numérique qui peut fournir le domaine électrique semiconducteur et le domaine micromécanique, à l'heure actuelle, les simulations numériques de ces dispositifs ont été réalisées avec les simulations hybrides. Pour fabrication des composants *MEMS* et microélectroniques, ils y'a plusieurs étape à suivre les plus importante sont la modélisation et la simulation des effets physiques du composent. La méthode de la simulation par les éléments finis a donné des résultats très proches de la réalité. l'une des puissants, méthode de simulation des effets physique est utilisé par la plat forme *COMSOL MULTIPHYSIC'S*

II. COMSOL MULTI PHYSIQUE

Est une plate-forme logicielle générale qui autorise la modélisation et la simulation des phénomènes physiques à l'aide de méthodes numériques avancées. *COMSOL Multiphysics* permet de coupler des physiques "simples" ou d'étudier des phénomènes multiphysiques. Pour étendre les simulations possibles, *COMSOL Multiphysics* comprend plus de 30 modules complémentaires qui offrent des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, fluide et chimique. De plus, des interfaces bidirectionnelles relient vos simulations réalisées dans *COMSOL Multiphysics* à des logiciels tiers de calcul, de *CAO (CAD)* et de *CAOE (ECAD)*. Grâce à sa flexibilité et associée à l'interface conviviale et intuitive du *COMSOL Desktop®*, le logiciel d'éléments finis *COMSOL Multiphysics®* simule quasiment tout ce que vous voulez. [34]

III. MODELISATION DU COMPORTEMENT DE PULL IN

Dans le cadre de cette simulation, on a étudié le *pull in* pour 3 longueur différent de grille suspendue, ce qui ne donne 3 valeur de K (constante de ressort) que l'on a calculé de l'équation (4) montre dans le chapitre 2 :

Avec E c'est le module de *young's*, W longueur de la grille suspendue, L l'épaisseur dans la direction perpendiculaire du plan (simulation 2D), h l'épaisseur de la grille

Est on a trouvé les résultats suivent :

- Pour une longueur de $W=1.6\mu\text{m}$ et largeur $L=1\mu\text{m}$ (épaisseur dans la direction perpendiculaire du plan) et une hauteur de $h=20\text{nm}$ pour une grille fixe-fixe en poly-si ($E=160\text{GPa}$) on aura $K=10\text{N/m}$

- Pour une longueur de $W=2\mu\text{m}$ et largeur $L=1\mu\text{m}$ (épaisseur dans la direction perpendiculaire du plan) et une hauteur de $h=20\text{nm}$ pour une grille fixe-fixe en poly-si ($E=160\text{GPa}$) on aura $K=5.12\text{N/m}$
- Pour une longueur de $W=3\mu\text{m}$ et largeur $L=1\mu\text{m}$ (épaisseur dans la direction perpendiculaire du plan) et une hauteur de $h=20\text{nm}$ pour une grille fixe-fixe en poly-si ($E=160\text{GPa}$) on aura $K=1.51\text{N/m}$
- **Problématique :**

Il existe des commentaires positifs entre les forces électrostatiques et la déformation de la grille suspendue (pont vibrant). Les forces plient la grille et réduire ainsi l'espace sur le substrat mis à la terre. Cette action, à son tour, augmente les forces, à une certaine tension que les forces électrostatiques surmontent les forces de contrainte, le système devient instable et l'écart s'effondre. Cette tension critique est appelée tension d'accrochage (*pull in*).

A des tensions appliquées inférieures à la tension d'accrochage, la grille reste dans une position d'équilibre où les forces de contrainte équilibreront les forces électrostatique.

Après la simulation du résonateur nous avons trouvé de très proches résultats avec la forme analytique qui montre la tension du *pull in*, qui est définie par l'équation :

$$V_{Pi} = \sqrt{\frac{4c_1B}{\epsilon_0 \cdot L^4 C_2^2 (1+c_3\frac{g_0}{W})}} \quad (26)$$

Avec $c_1=0.07$, $c_2=1.00$ et $c_3=0.42$ sont des constantes pour la condition fixe-fixe de la grille suspendue, g_0 c'est le gap entre les deux électrodes L , W sont la largeur et la longueur de la grille suspendue, et :

$$B = EH^3 g_0^3 \quad (27)$$

Avec E c'est le module de *young's* et H c'est l'épaisseur de la grille.

IV. **MODELISATION ET SIMULATION PULL IN**

1. **Présentation du modèle**

Dans cette simulation on va commencer par étudier un modèle de résonateur 2D et chercher sa tension du *pull in* (figure 3.2). Ensuite on prendra le modèle du *MOSFET*, dans le module des semi-conducteurs, qui est déjà existant dans la bibliothèque des modèles *COMSOL*, et qui consiste à calculer le courant du drain en fonction de la tension de la grille dans le régime linéaire, et on ajoutera une structure électrostatique au-dessus du transistor et on modifiera la grille en poly silicium, qui sera séparée de l'oxyde par un gap d'air, comme le montre la (figure 3.1), et on va injecter

de dans les résultat de la 1^{er} simulation(Le déplacement du résonateur en fonction de la tension).

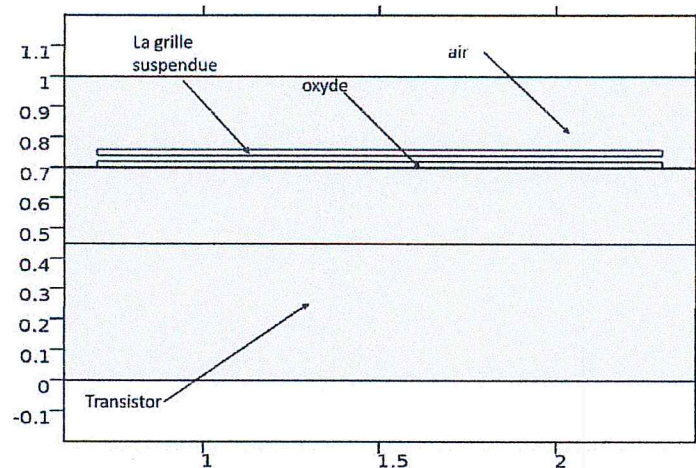


Figure (3.1) structure du SG-MOSFET sur COMSOL

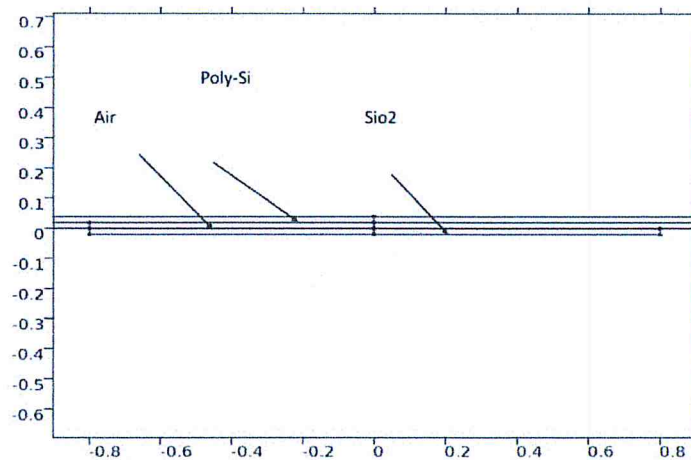


Figure (3.2) : structure de résonateur 2D

Procédure d'introduction d'un modèle pour la méthode des éléments finis (FEM) sous COMSOL Multiphysics :

Cette simulation se compose de étapes suivantes :

- ✓ définition de la géométrie et les paramètres de la simulation.
- ✓ sélection de la physique.
- ✓ définition des matériaux.
- ✓ sélections des conditions aux limites de la physique
- ✓ le maillage.
- ✓ type d'étude.

2. Simulation du résonateur 2D :

a. Les paramètres et la géométrie :

On saisies les paramètres suivants dans le modèle.

Comme on a étudié 3 cas de résonateur on a 3 géométries qui sont les même sauf pour la longueur (1.6µm, 2µm, 3µm) mais pour les épaisseurs du résonateur et de l'air et de l'oxyde sont les même (20nm) figure (3.3).

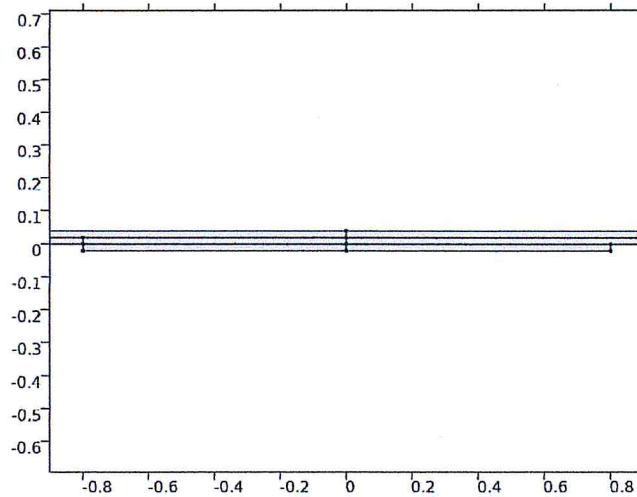


Figure (3.3) géométrie du résonateur dans COMSOL

b. La physique

L'utilisation de la physique *ELECTROMECHANICS (emi)* elle combine la physique du *solid mechanics* et *Electrostatics* pour le model de déformation de la structure d'actionnement de la force électrostatique. Et dans le tableau suivant les paramètres initiaux. [35].

c. Matériaux

On a définie 3 matériels pour cette simulation pour les 3 régions de la structure du résonateur qui sont :

Si – Polycrystalline

Nom	Valeur	Unité
Masse volumique	2320[kg/m ³]	kg/m ³
Module d'Young	160e9[Pa]	Pa
Coefficient de Poisson	0.22	1

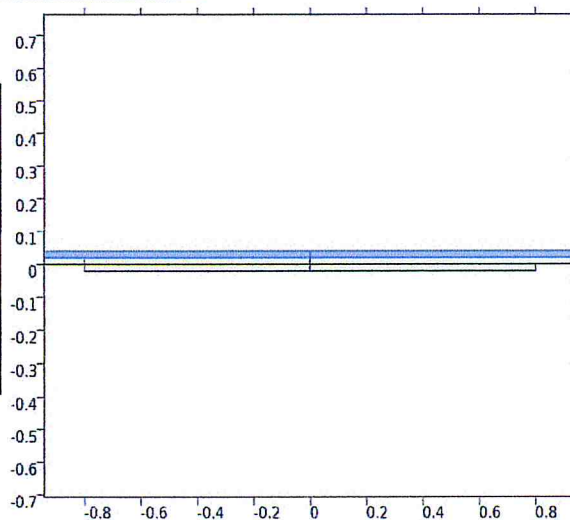


Figure (3.4) : 1^{er} régions du résonateur en poly-Si

Air

Nom	Valeur	Unité
Permittivité relative	1	1

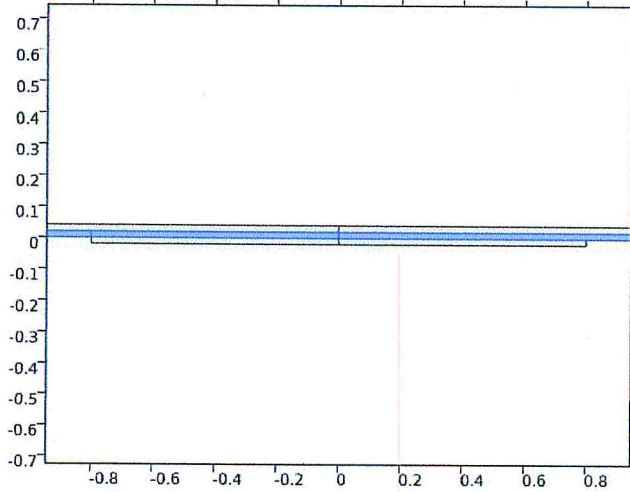


Figure (3.5) : 2^{ème} région du résonateur en Air

SiO2 oxyde de silicium

Nom	Valeur	Unité
Permittivité relative	4.2	1

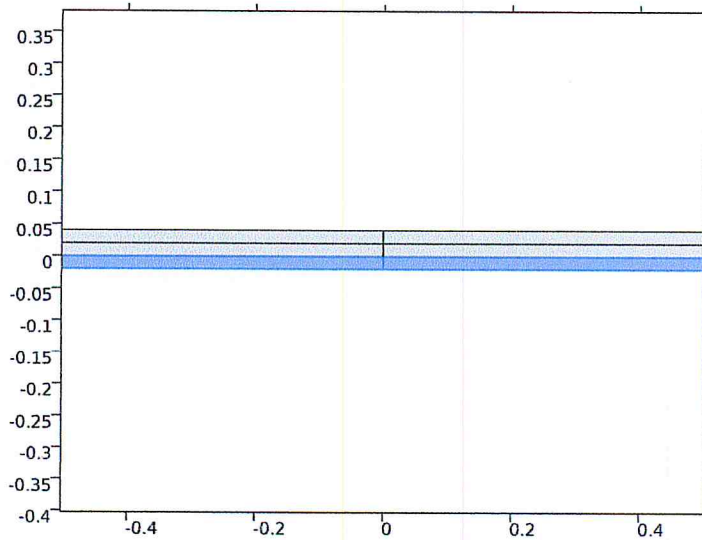


Figure (3.6) 3^{ème} région du résonateur en Sio2

d. Conditions aux limites de la physique

On a choisi *Free Deformation* c'est pour la déformation libre ne limite que le déplacement du maillage uniquement par les conditions aux limites des limites environnantes. Le déplacement dans le domaine est obtenu en résolvant une *PDE* (équation différentielle partielle).

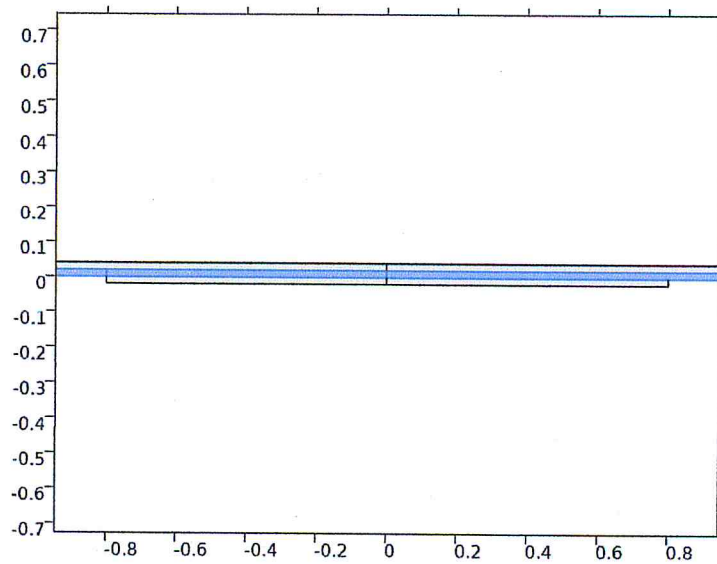


Figure (3.7) : région de condition *free deformation*

On a choisi *Electrical Material Model 1* pour qu'elle ajout les équations nécessaires pour résoudre un champ électrique statique ou quasi-statique.

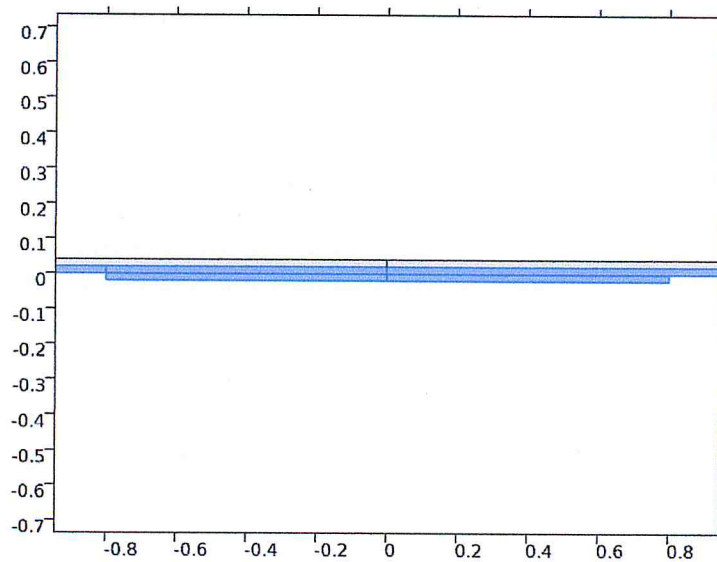


Figure (3.8) : région de la condition *Electrical Material Model*

L'utilisation de *Zero charge* c'est la condition qu'il n'y a pas de charge sur la limite de sorte que $n \cdot D = 0$, cela signifie qu'aucun champ de déplacement ne peut pénétrer dans la limite et que le potentiel électrique est discontinu à travers la frontière.

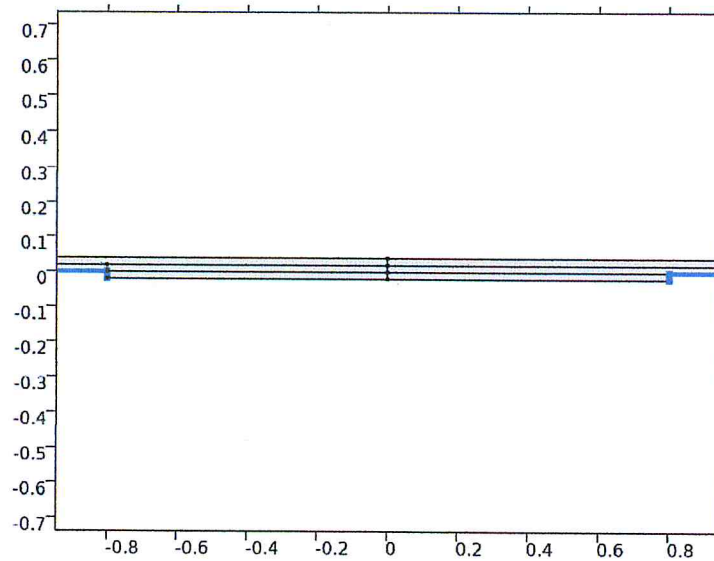


Figure (3.9) : région pour la condition *Zero charge*

Après On a choisi *Free* Le nœud libre est la condition limite par défaut. Cela signifie qu'il n'y a pas de contraintes et pas de charges agissant sur la limite.

Dans ce cas il n'y a aucune région dans la géométrie qui a cette condition

Après *Electromechanical Interface* Un nœud d'interface électromécanique est automatiquement ajouté au modèle en tant que nœud par défaut. Des conditions de limites appropriées pour la déformation du maillage sont également incluses dans cette condition aux limites.

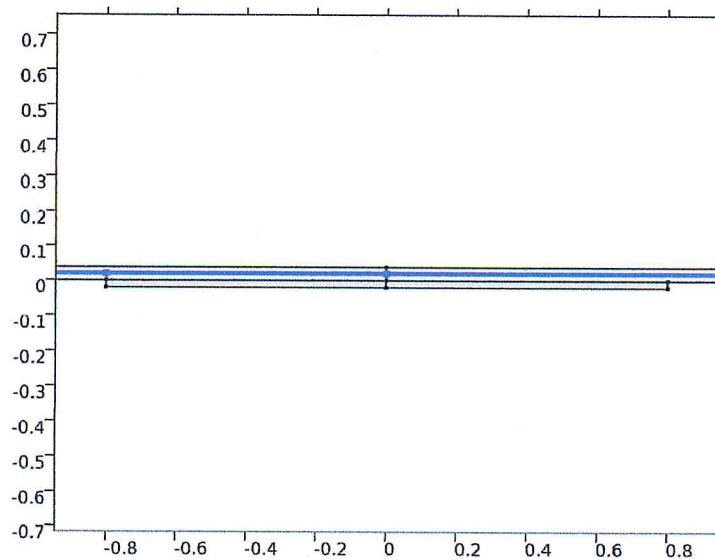


Figure (3.10) région pour la condition *Electromechanical Interface*

On utilise *Prescribed Mesh Displacement* Le nœud de déplacement de mailles prescrites sur la limite des domaines avec déformation gratuite. Le cadre spatial dans



le domaine adjacent se déplace en fonction du déplacement. Les paramètres par défaut fournissent une limite fixe (déplacements zéro dans toutes les directions).

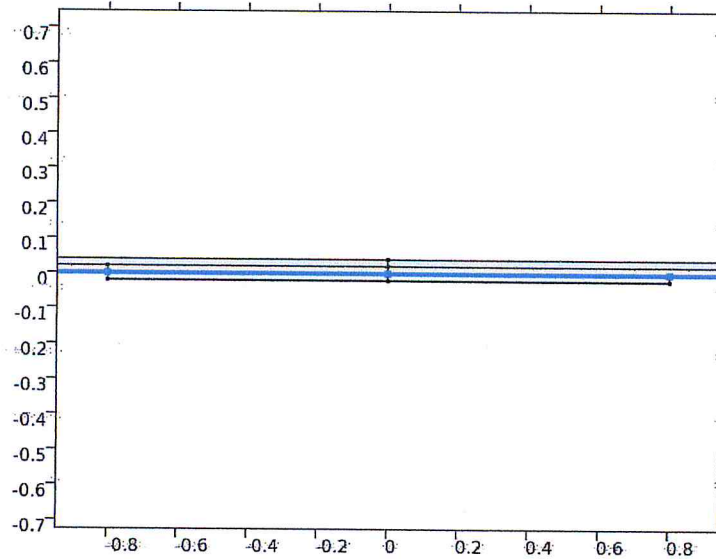


Figure (3.11) région pour la condition *Prescribed Mesh Displacement*

On met *Initial Values* Le nœud Valeurs initiales ajoute des valeurs initiales pour le potentiel électrique et le champ de déplacement solide. Ces variables peuvent servir de condition initiale pour une simulation transitoire ou comme hypothèse initiale pour une analyse non linéaire.

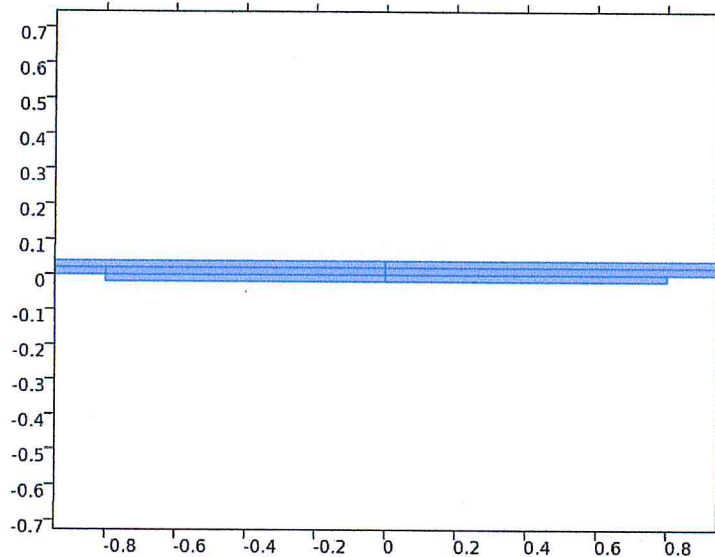


Figure (3.12) : région pour la condition *Initial Values*

Après on met *Linear Elastic Material* Le nœud du matériel élastique linéaire comprend uniquement les équations de la mécanique structurale. Cette fonctionnalité doit être utilisée lorsque le potentiel est constant dans la région solide, de sorte que le champ électrique est nul. Un exemple typique serait une structure métallique maintenue à un potentiel fixe. Étant donné que le champ électrique est

nul, il n'y a pas de forces électriques agissant dans le domaine, mais les forces agissant sur la surface sont capturées par le nœud de l'interface électromécanique, qui obtient automatiquement la sélection appropriée.

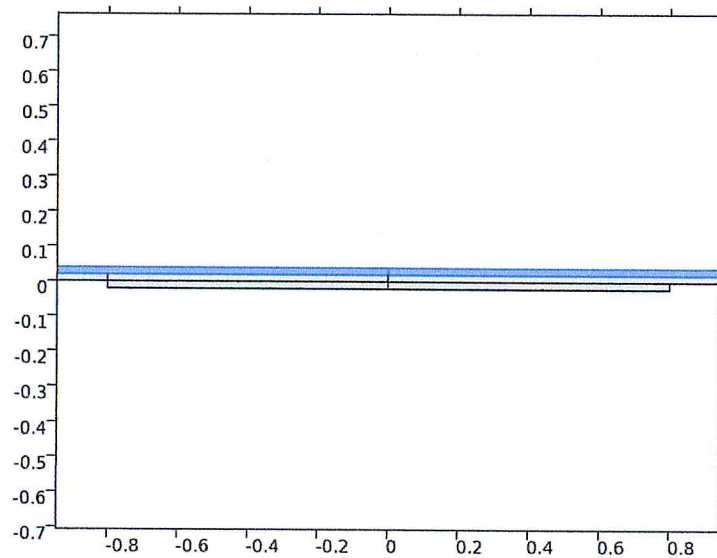


Figure (3.13) région pour la condition *Linear Elastic Material*

Utilisation de *Fixed Constraint* Ce nœud ajoute une condition qui rend l'entité géométrique fixe (entièrement contrainte) ; C'est-à-dire que les déplacements sont nul dans toutes les directions. S'il y a des degrés de liberté de rotation, ils seront également zéro.

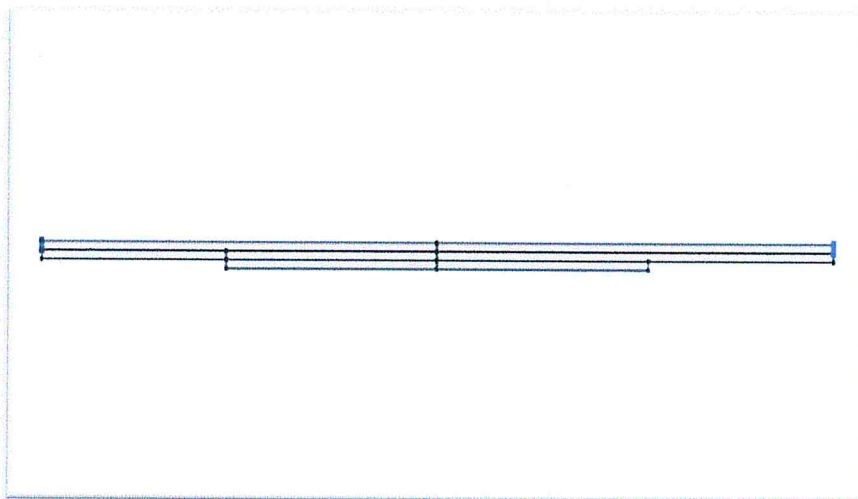


Figure (3.14) : région pour la condition *Fixed Constraint*

Après *Ground* le nœud *Ground* implémente la masse (potentiel zéro) comme condition limite $V = 0$. La masse signifie qu'il existe un potentiel zéro sur la limite. Cette condition limite est également applicable aux limites de symétrie où le potentiel est connu pour être antisymétrique par rapport à la limite.

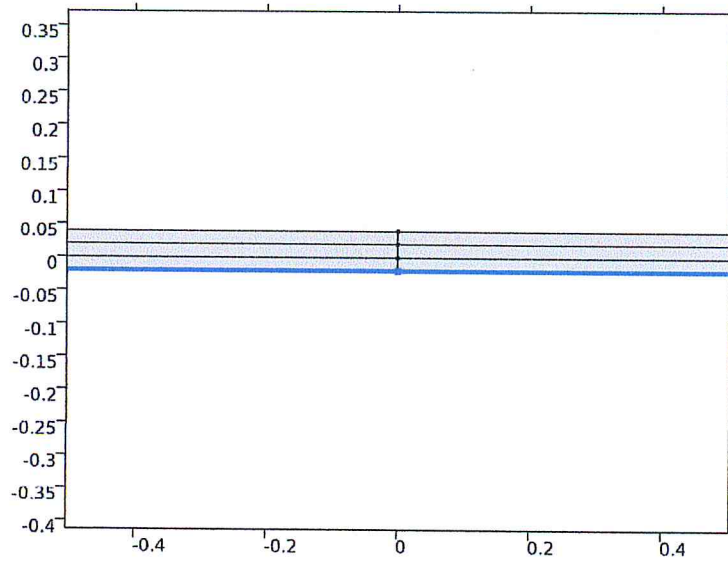


Figure (3.15) : région pour la condition *Ground*

En fin *Electric Potential* : Le nœud Potentiel électrique fournit un potentiel électrique V_0 comme condition limite $V = V_0$.

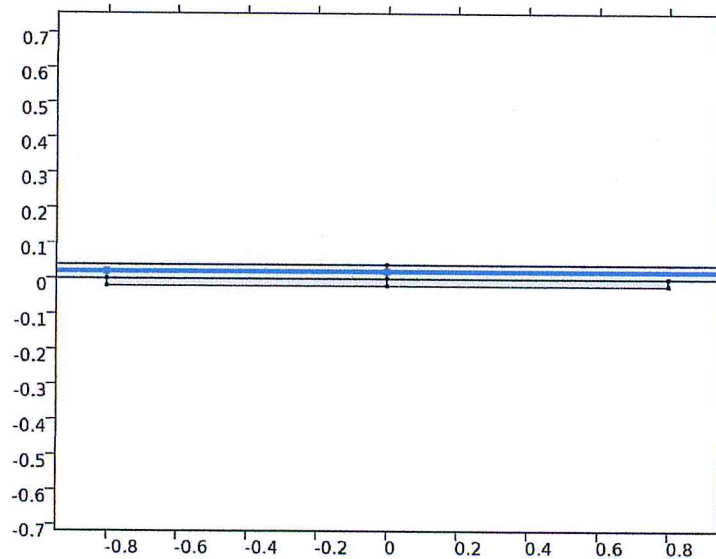
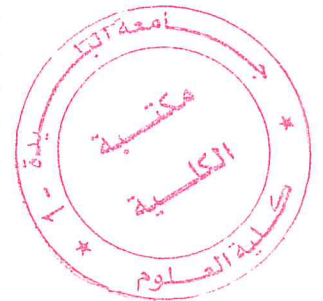


Figure (3.16) : région pour la condition *Electric Potential*



e. Le maillage

Le maillage de la structure est l'étape la plus critique de la simulation car c'est du choix des dimensions et de la nature des éléments du maillage que peut dépendre la convergence ou pas vers une solution exacte [36]. pour le cas de notre simulation on a choisi un maillage quadrilatéral structure, de taille normale comme le montre la figure (3.17)

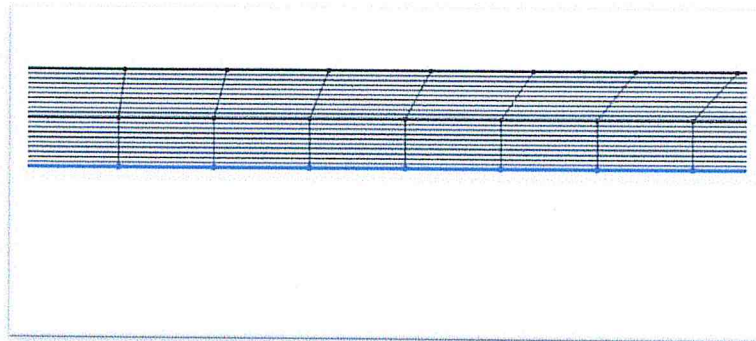


Figure (3.17) : maillage quadrilatéral structure

f. L'étude

Afin de fixer la méthode numérique de résolution, il est important de définir le type d'analyse demandé. En premier, nous trouvons l'analyse stationnaire qui calcule les solutions indépendante du temps, autrement dit, les solutions en régime statique. [36]

3. Simulation du SG-MOSFET

a. Paramètre

Nom	Expression	Valeur	Description
Vd	10[mV]	0.01 V	<i>Drain voltage</i>
Vg	2[V]	2 V	<i>Gate voltage</i>
Tox	20[nm]	2E-8 m	Epaisseur d'oxyde
Tgate	20[nm]	2E-8 m	Epaisseur de la grille
Gap	20[nm]	2E-8 m	Epaisseur du gap
Chlengh	1.6[μm]	1.6E-6 m	Longueur du canal

Avec V_d c'est le courant du drain, V_g la tension de la grille suspendue, t_{ox} l'épaisseur de la couche d'oxyde, t_{gate} l'épaisseur de la grille, gap l'épaisseur du gap, $chlengh$ la longueur du canal et de l'oxyde et de la grille suspendue.

b. Géométrie

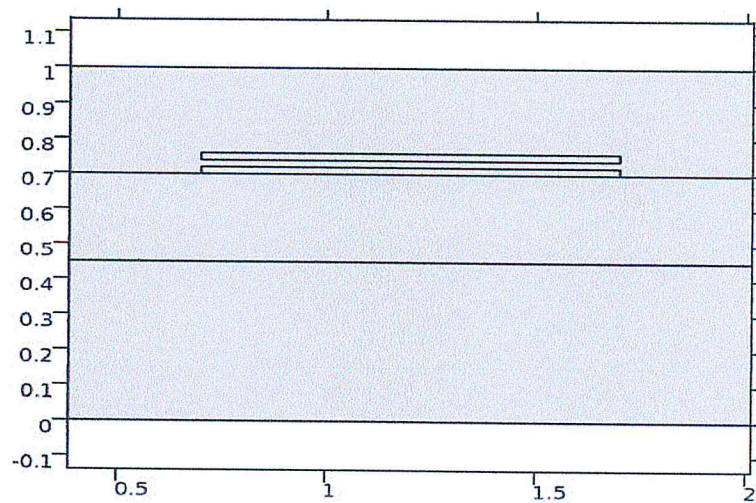


Figure (3.18) : la géométrie du SG-MODFET dans COMSOL

c. La physique

Pour ce modèle on ajoute 2 physiques, la physique de *Semiconductor semi* pour la structure du transistor, et la physique *Electrostatics es* pour la géométrie entière. Figure (3.19).

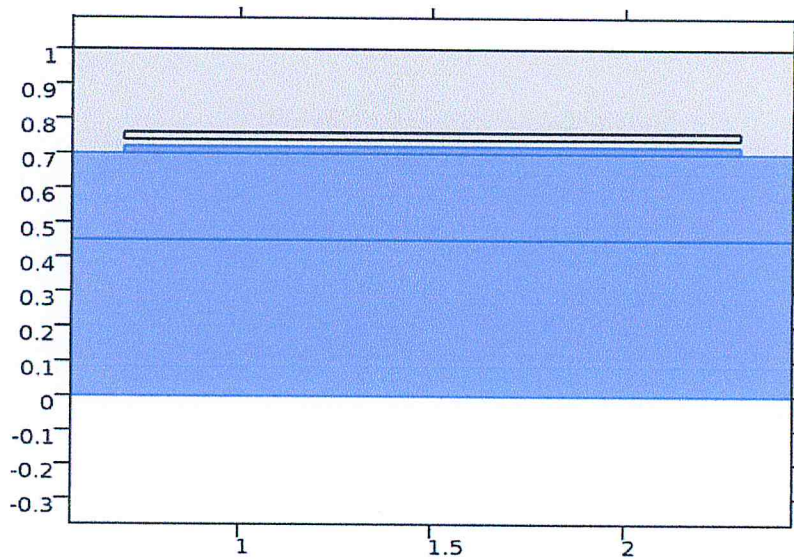


Figure (3.19) : Domain de la physique *Semiconductor semi*

d. Les matériaux

Si – silicium

Nom	Valeur	Unité
Permittivité relative	11.7	1
Durée de vie des électrons, SRH	10[us]	s
Durée de vie des trous, SRH	10[us]	s
Bande interdite	1.12[V]	V
Affinité électronique	4.05[V]	V
Densité efficace d'états, bande de valence	$(T/300[K])^{3/2} * 1.04e19 [1/cm^3]$	$1/m^3$
Densité efficace d'états, bande de conduction	$(T/300[K])^{3/2} * 2.8e19 [1/cm^3]$	$1/m^3$
Mobilité électronique	1450[cm ² /(V*s)]	m ² /(V*s)
Mobilité des trous	500[cm ² /(V*s)]	m ² /(V*s)
Coefficient de Jain-Roulston (n-type), A	3.5e-8[V]	V

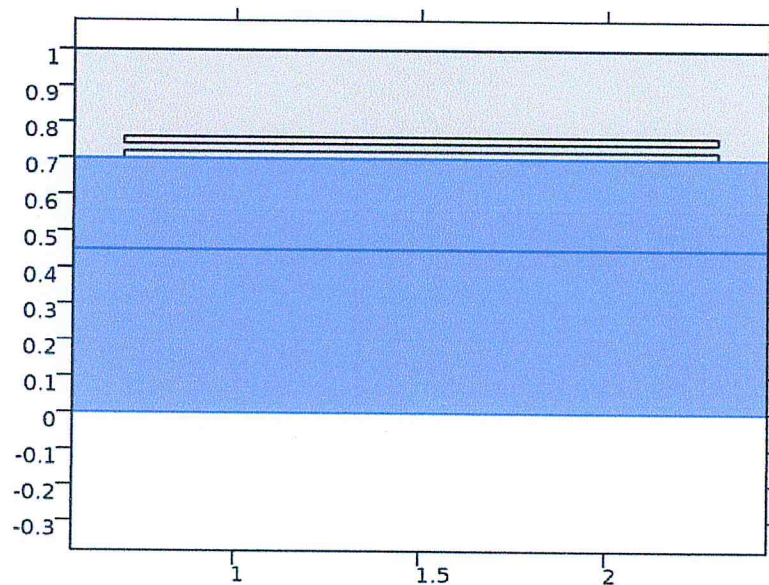


Figure (3.20) : Domain du matériau Si (transistor)

SiO₂ – oxyde de silicium

Nom	Valeur	Unité
Permittivité relative	4.2	1

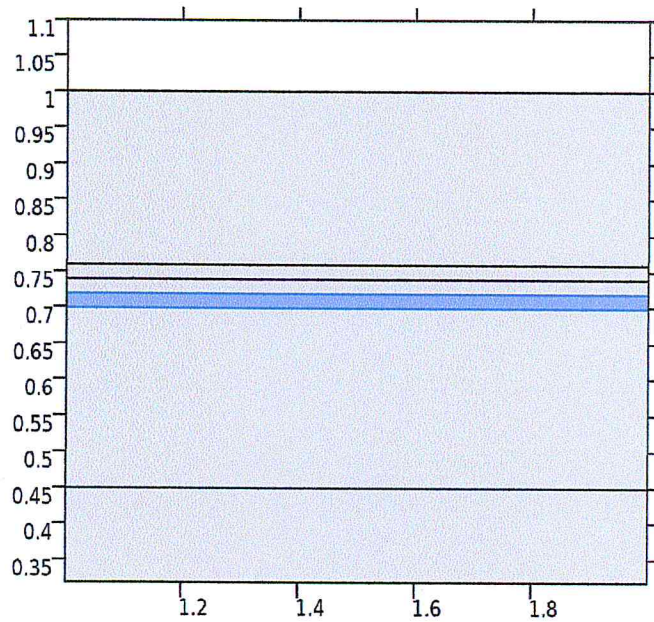


Figure (3.21) : Domain de l'oxyde du silicium

Poly-silicium

Nom	Valeur	Unité
Masse volumique	2320[kg/m ³]	kg/m ³
Module d'Young	160e9[Pa]	Pa
Coefficient de Poisson	0.22	1

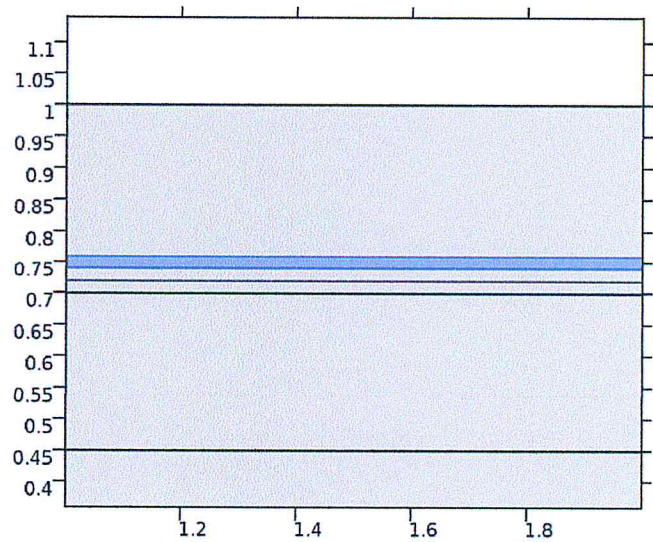


Figure (3.22) : Domain du poly-si (la grille suspendue)

Air

Nom	Valeur	Unité
Permittivité relative	1	1

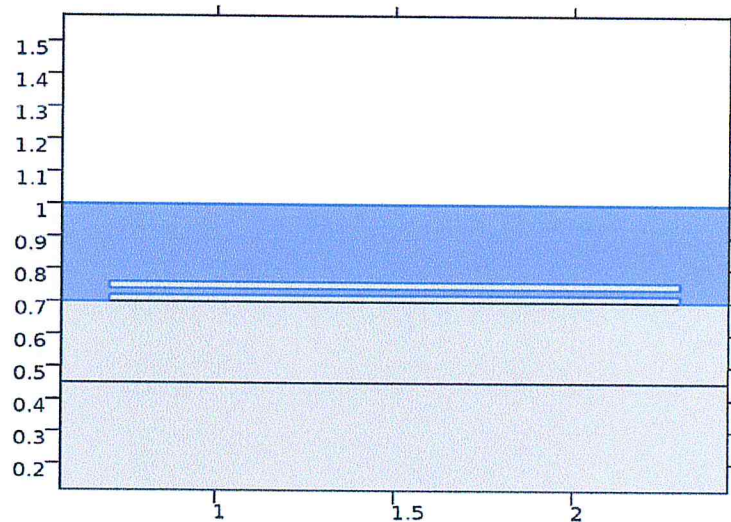


Figure (3.23): Domain de l'air

e. Les conditions aux limites pour semiconducteur

d'une interface physique, résout l'équation de Poisson pour le potentiel électrique et les équations de dérive-diffusion pour les électrons et les trous dans un matériau semiconducteur. La caractéristique de domaine par défaut est le modèle de matériau semiconducteur, qui ajoute ces équations au domaine, en résolvant le potentiel électrique et les variables dépendantes liées aux concentrations d'électrons et de trous. [35] pour les conditions aux limite sont base sur le model démontre dans [37], et on a ajouté une structure de capacité électro statique au-dessus du transistor comme on la montre dans la figure (3.1)

f. Le maillage

Pour le maillage on a utilisé le Triangle libre pour tout la géométrie, mais on a utilisé une taille très fin pour les Frontières montre par la figure (3.24)

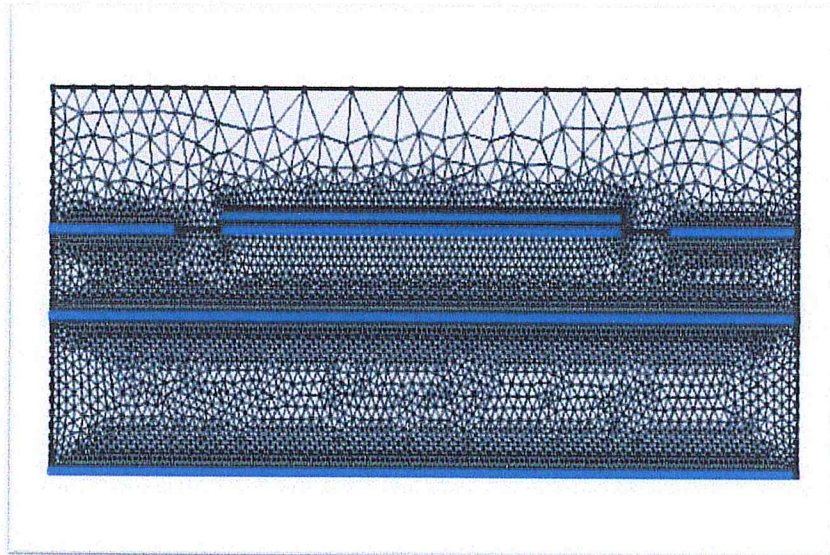


Figure (3.24) : maillage triangle libre pour la structure du *SG-FET*

g. L'étude :

On utilise une analyse stationnaire indépendante du temps pour cette simulation.

V. CONCLUSION

l'étude du changement de petite inclinaison *SG-FET* basé sur une approche de simulation numérique hybride *comsol Multiphysics*. Les simulations numériques hybrides permettent de manière unique la recherche de la physique des dispositifs complexes micro-électro-mécaniques / à semiconducteurs, tels que *SG-FET*. La commutation et l'effet brusques des charges de grille sont démontrés. Les données numériques servent à étalonner un modèle *SG-FET* analytique, qui est utilisé pour concevoir et simuler *SG-FET* à échelle réduite micro métrique Il est démontré que, en raison d'un changement brusque dans la région de sous-seuil et l'hystérésis électromécanique,

CHAPITRE 4

Résultats

I. INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre nous allons afficher et analyser les résultats des simulations que nous avons effectuées et qui sont représentées par des graphes, montrant la caractéristique en régime linéaire (I_d vs V_g lorsque $V_d=10\text{mV}$) et la tension de seuil du *SG-MOSFET* et du pont vibrant en mode pull in, et nous allons les comparer avec les caractéristiques d'un *MOSFET* normal et un *MOSFET* à gap d'air.

II. MOSFET NORMAL

Dans le cas du *MOSFET* normal nous avons simulé 3 *MOSFET* de différentes épaisseurs d'oxyde de grille 5nm, 10nm, 20nm, en fixant $V_d=10\text{ mV}$ et variant V_g de 0V à 4V et nous avons les résultats suivants :

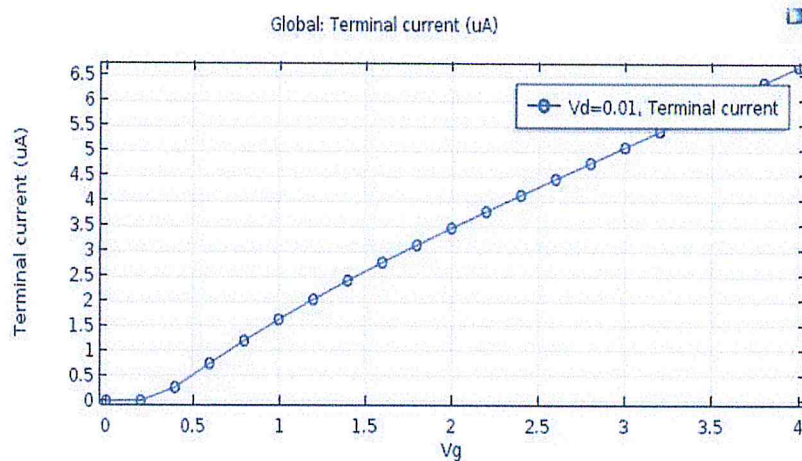


Figure (4.a.1) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* d'épaisseur d'oxyde 5 nm

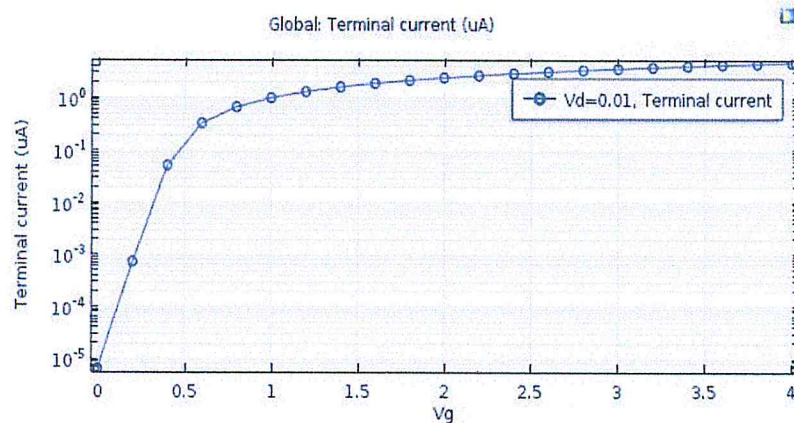


Figure (4.b.1) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* d'épaisseur d'oxyde de 5 nm en échelle logarithmique

De la figure (4.a.1) on remarque que pour un *MOSFET* d'épaisseur d'oxyde de 5 nm la tension de seuil et de $V_{th}=0.3\text{V}$

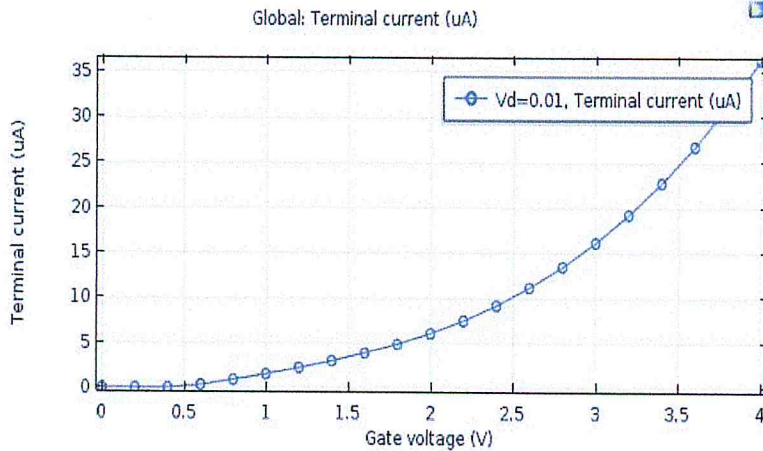


Figure (4.a.2) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* d'épaisseur d'oxyde de 10nm

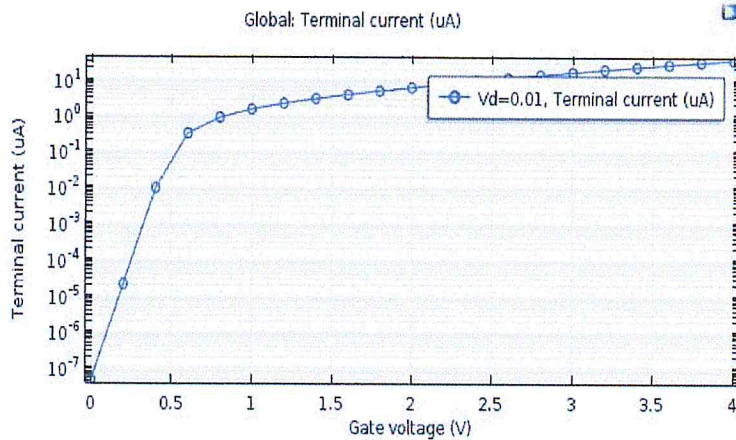


Figure (4.b.2) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* d'épaisseur d'oxyde de 10nm en échelle logarithmique

Les figures (4.a.2) et (4.b.2) montrent que pour un *MOSFET* d'épaisseur d'oxyde de 10 nm on aura une tension de seuil est égale à $V_{th}=0.5V$

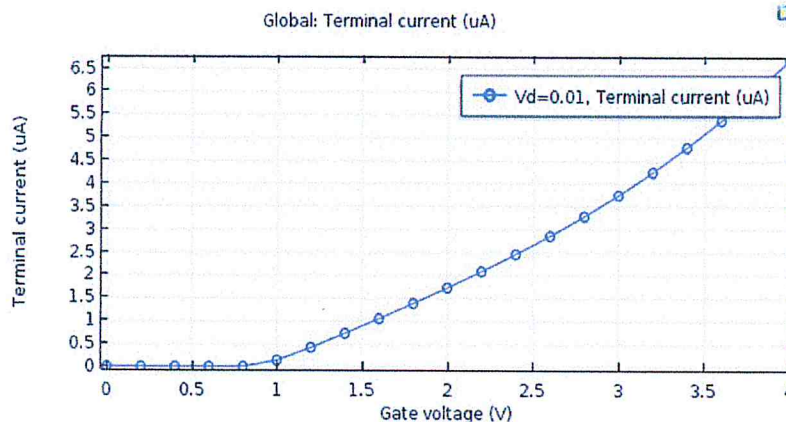


Figure (4 a 3) : I_d vs V_g pour un *MOSFET* d'épaisseur d'oxyde de 20 nm

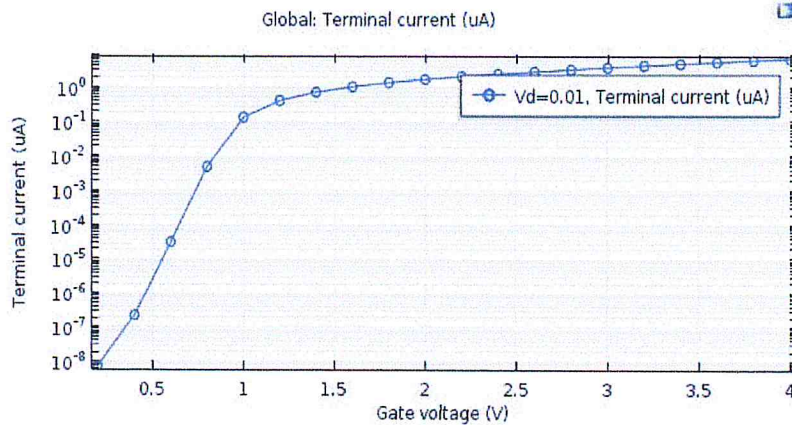


Figure (4.a.3) : I_d vs V_g d'un MOSFET d'épaisseur d'oxyde de 20 nm en échelle logarithmique

Les figures (4.a3) et (4.b.3) montrent que la tension de seuil d'un MOSFET d'épaisseur d'oxyde de 20 nm est de $V_{th}=0.7V$

III. MOSFET A GAP

Dans le cas du MOSFET à gap nous avons aussi simulé 3 MOSFET à gap de différentes épaisseurs de l'oxyde de grille 5nm, 10nm, 20nm mais ils ont tous la même valeur du gap d'air=20nm et toujours en fixe V_d dans la région linéaire $V_d=10mV$ et on varie V_g de 0V a 4V et les résultats sont représentés dans les graphes suivants :

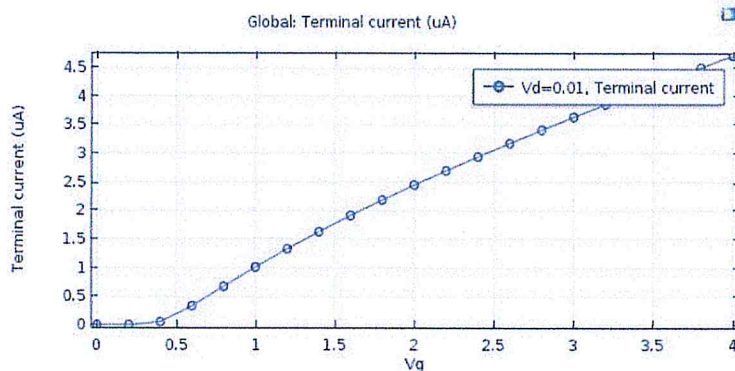


Figure (4.a.4) : I_d vs V_g d'un MOSFET à gap d'air d'épaisseur d'oxyde de 5 nm

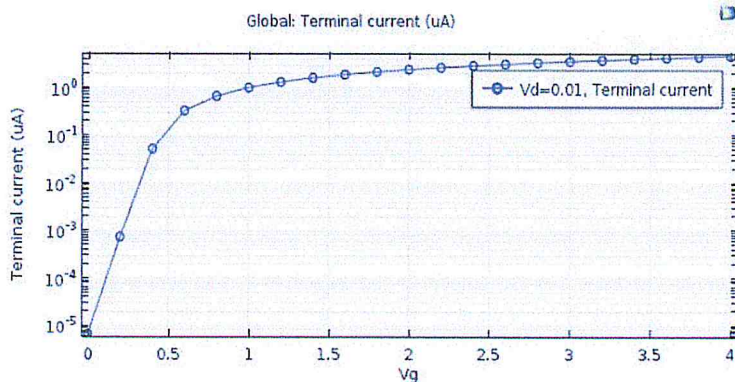


Figure (4.b.4) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* à gap d'air d'épaisseur d'oxyde de 5 nm en échelle logarithmique

Pour le cas du *MOSFET* à gap nous avons remarqué que la tension de seuil a changé par rapport à celle de *MOSFET* et elle est désormais égale à $V_{th}=0.4V$ pour l'épaisseur d'oxyde 5 nm

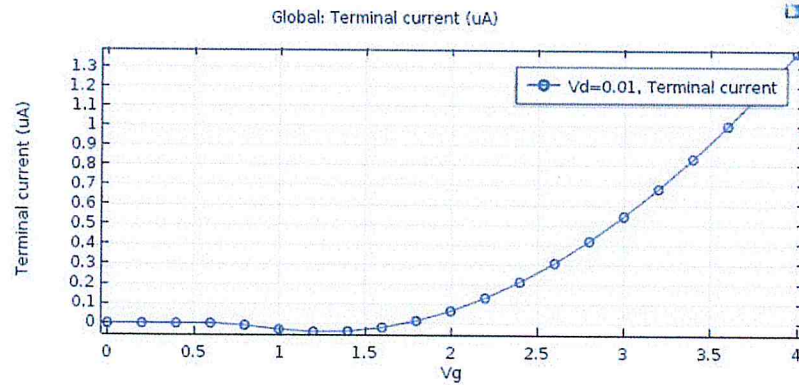


Figure (4.a.5) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* à gap d'épaisseur d'oxyde de 10nm

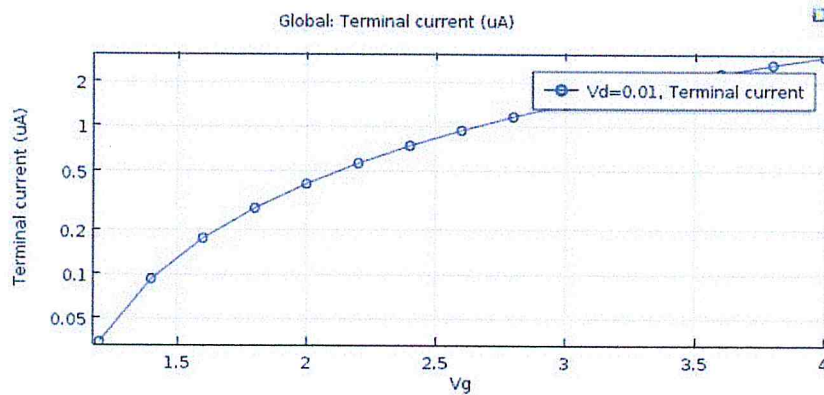


Figure (4.b.5) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* à gap d'épaisseur d'oxyde de 10 nm en échelle logarithmique

Dans ce cas les figures (4.a.5) et (4.b.5) montrent une tension du seuil du *MOSFET* à gap de $V_{th}=1.2V$ pour l'épaisseur d'oxyde de 10 nm

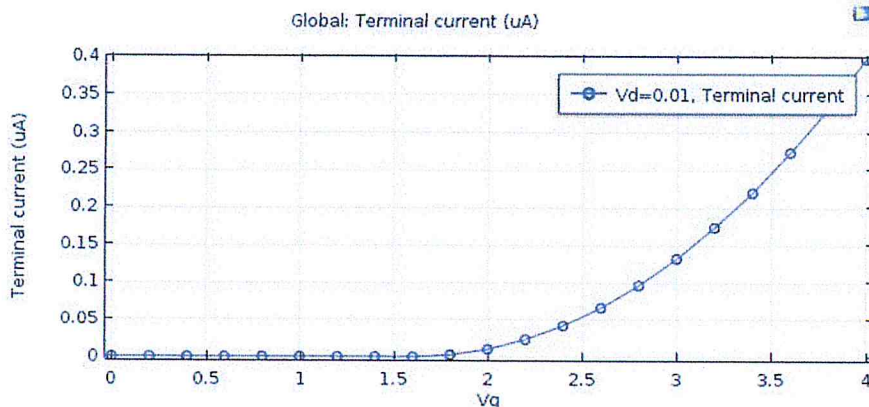


Figure (4.a.6) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* à gap d'épaisseur d'oxyde de 20nm

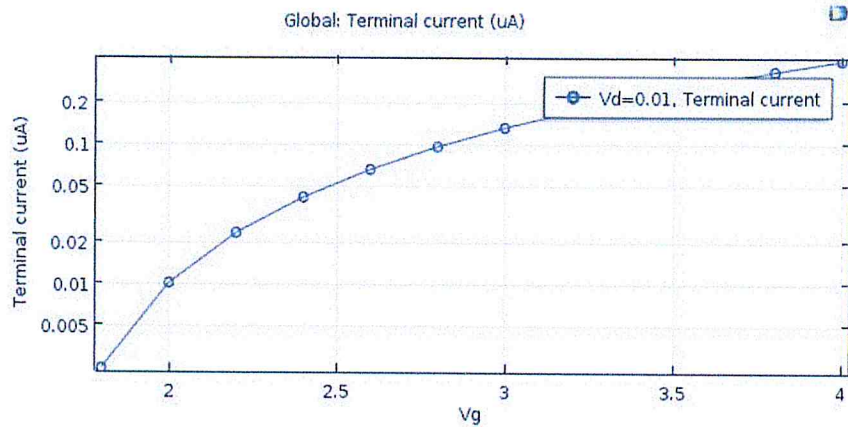


Figure (4.b.6) : I_d vs V_g d'un *MOSFET* à gap d'épaisseur d'oxyde de 20 nm en échelle logarithmique

En fin nous avons trouvé la valeur de tension de seuil pour *MOSFET* à gap avec une épaisseur d'oxyde de 20 nm est égal à $V_{th}=1.4V$

IV. RESONATEUR (PONT VIBRANT) EN MODE PULL IN

On a effectué cette simulation pour 3 longueurs différentes du résonateur ce qui nous donne 3 différentes constantes du ressort, pour trouver la valeur du déplacement en fonction de la tension de la grille, ce qui nous permette de trouver la tension du *pull in* et les résultats sont représentés par les graphes suivants :

1. Pour un résonateur de longueur de 3 μ m

Pour ce cas d'après les calculs analytiques nous avons trouvé déterminé la valeur de la constante du ressort à $K=1.51N/m$

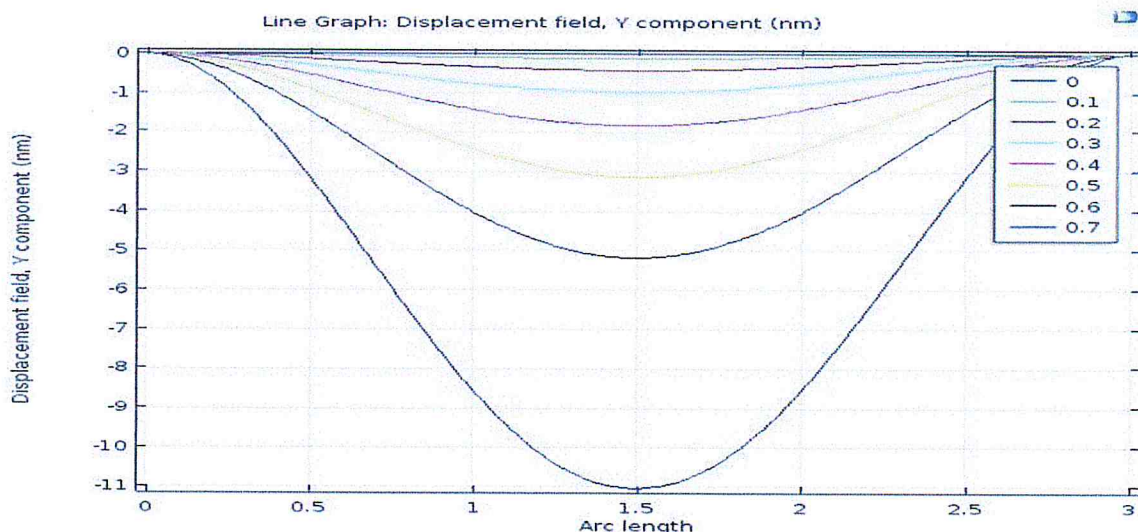


Figure (4.a.7) : Déflexion du résonateur en fonction de la tension V_g appliquée

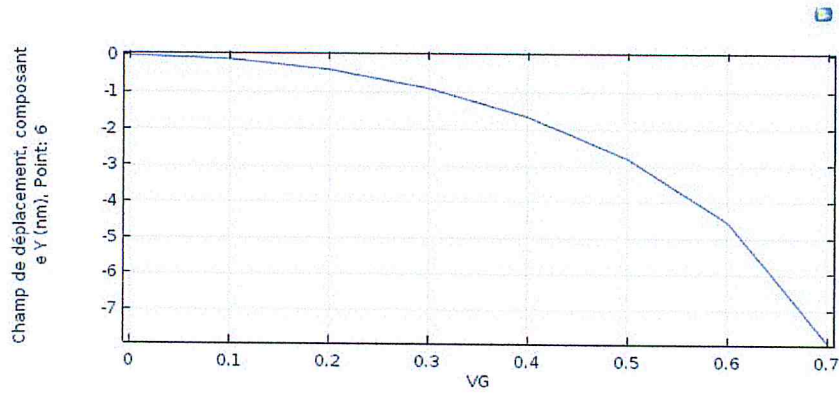


Figure (4.b.7) : Déplacement mécanique du gap d'air en fonction de la tension V_g appliquée

Les figures (4.a.7) et (4.b.7) montrent que le déplacement maximal du micro pont est au milieu il est de $1.5\mu\text{m}$ et la tension du pull in est de $V_{pi} = 0.7\text{V}$.

2. Pour un résonateur de longueur de $2\mu\text{m}$

Après les calculs on a estimé la constante du ressort à $K=5.12\text{N/m}$ et nous avons dégagé les résultats suivants :

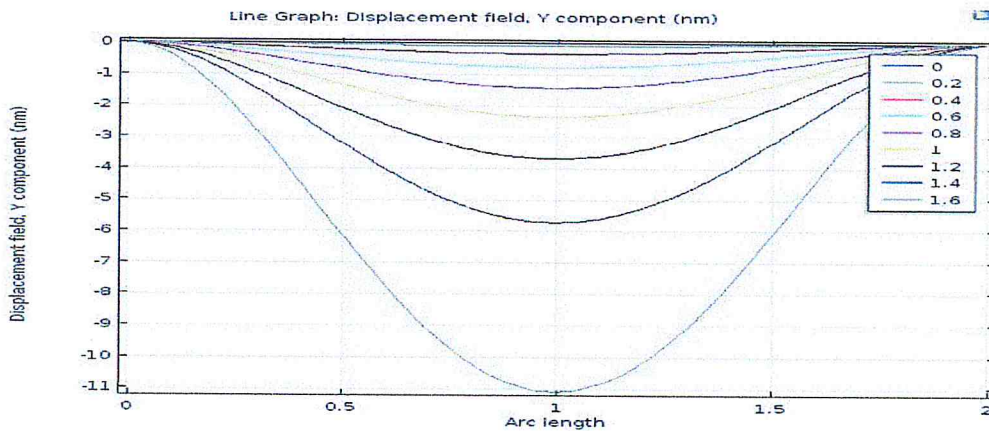


Figure (4.a.8) : Déflexion du résonateur en fonction de la tension V_g appliquée

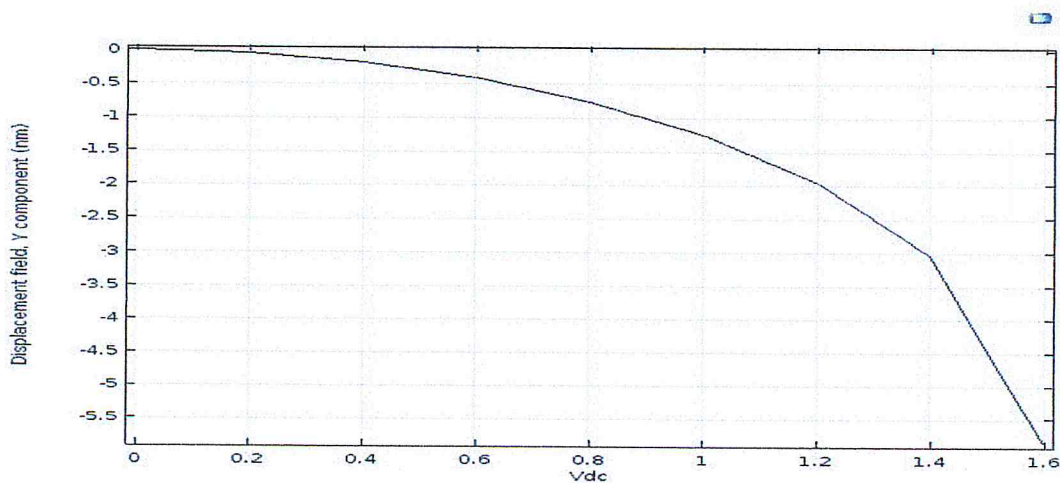


Figure (4.b.8) : Déplacement mécanique d'un point milieu dans gap d'air en fonction de la tension V_g appliquée

Pour ce cas aussi nous avons trouvé que le déplacement maximal est au milieu mais la valeur de la tension de traction a changé en $V_{pi}=1.6V$

3. Pour un résonateur de longueur de $1.6\mu m$

Pour ce cas la constant du ressort est égale à $K=10N/m$ et les résultats de simulation sont comme suit :

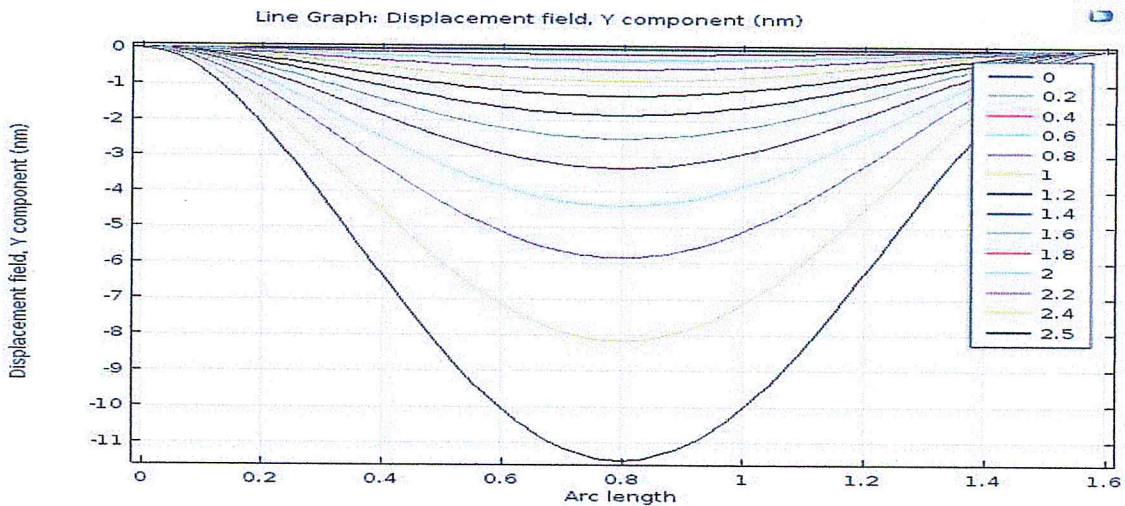


Figure (4.a.9) : Déflexion du résonateur en fonction de la tension V_g appliquée

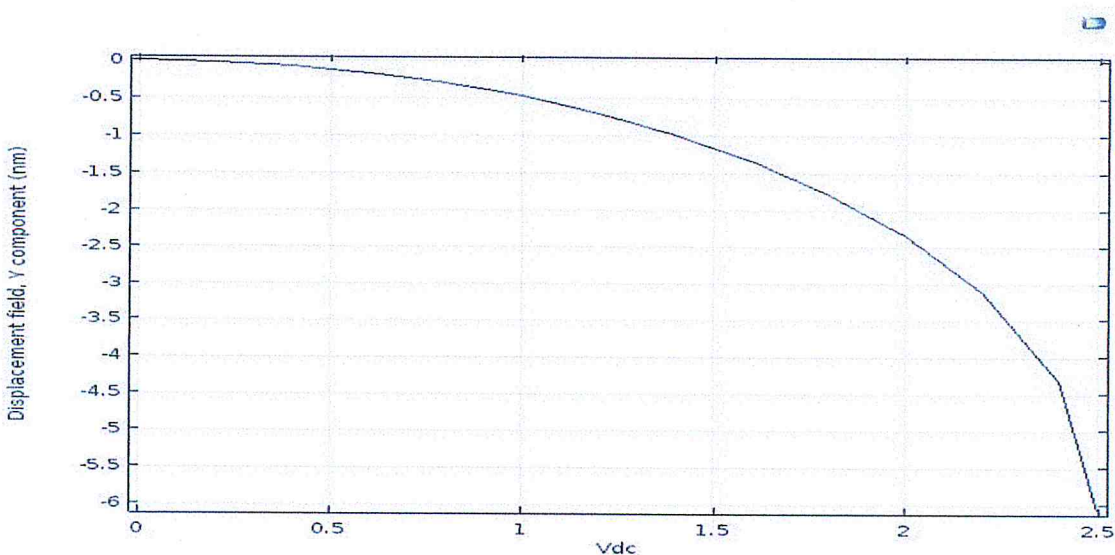


Figure (4.b.9) : Déplacement mécanique du gap d'air en fonction de la tension V_g

Dans ce cas on a le même point de déplacement maximal mais la valeur du pull in a augment $V_{pi}=2.5V$

V. SG-MOSFET

Lors de cette étude nous n'avons pas réussi à simuler l'effet de *SG-MOSFET* directement, donc on a pris les résultats du résonateur (déplacement en fonction de tension) et on les a introduit dans la simulation du *MOSFET* à gap d'épaisseur de 20 nm, sachant que dans ce cas le gap devient variable en fonction du déplacement et lors du *pull in* le *MOSFET* a gap ,devient ordinaire et nous avons représenté les courbes suivantes :

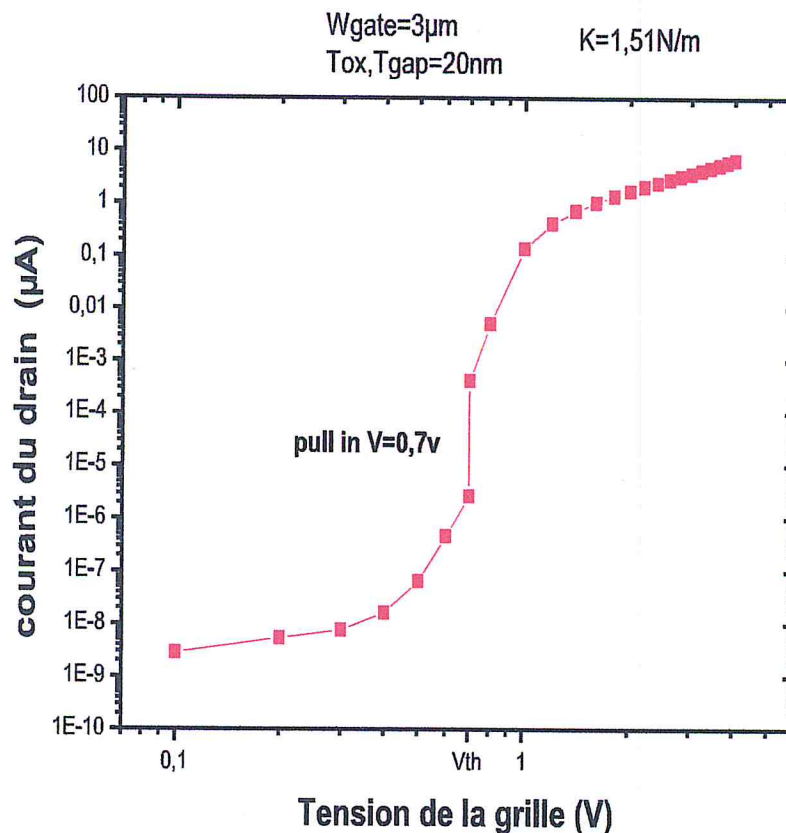


Figure (4.a.10) : I_d vs V_g d'un *SG-MOSFET* pour une grille de longueur 3µm en échelle logarithmique

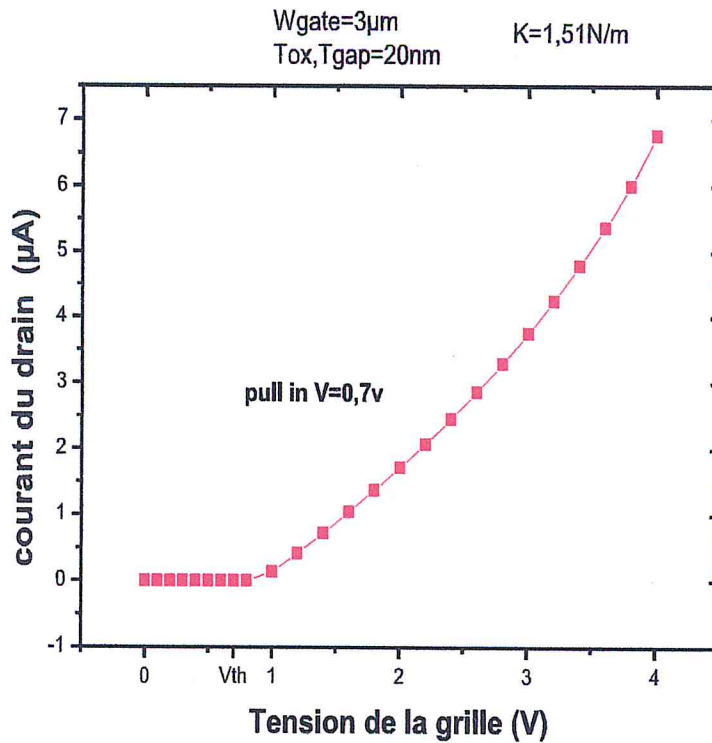


Figure (4.b.10) : I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une longueur de grille de $3\mu m$

Dans ce cas on a une tension de traction $V_{pi}=0.7V$ et la tension de seuil pour un MOSFET à gap de 20nm d'épaisseur d'oxyde est de $V_{th}=1.4V$, mais lorsque on arrive au pull in $V_{pi}=0.7V$ l'inversion commence car il devient un MOSFET normale qui a une tension de seuil $V_{th}=0.7V$

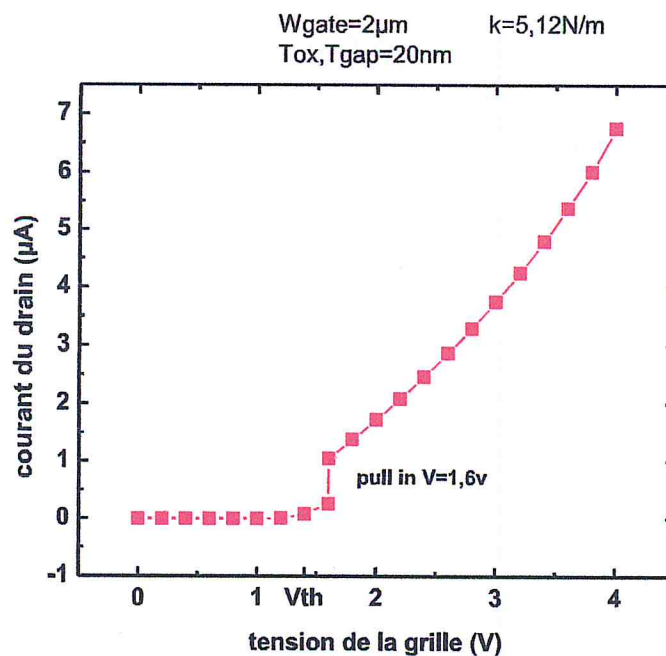


Figure (4.a.11) : I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur $2\mu\text{m}$

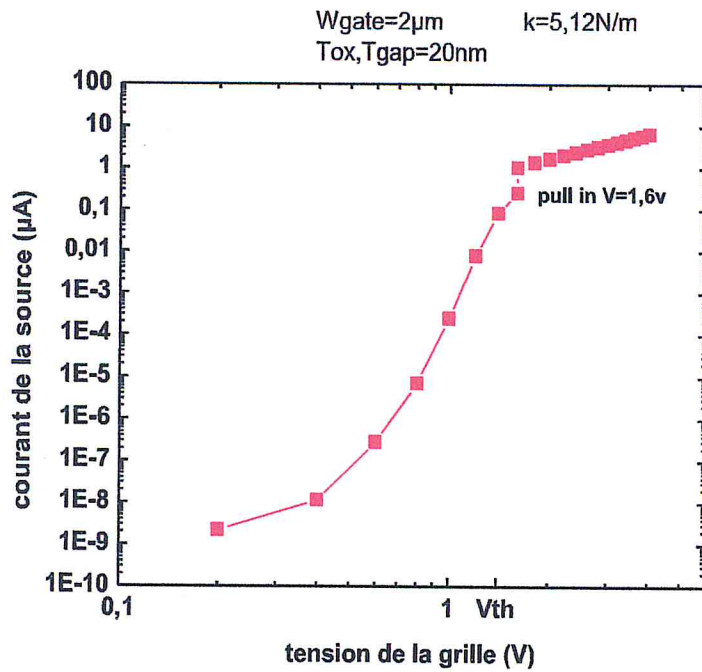


Figure (4.b.11) : I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur $2\mu\text{m}$ en échelle logarithmique

Dans ce cas on a la tension de seuil du MOSFET a gap $V_{th}=1.4\text{V}$ et la tension de traction $V_{pi}=1.6\text{V}$ donc l'inversion commence ensuite on aura le saut du *pull in*

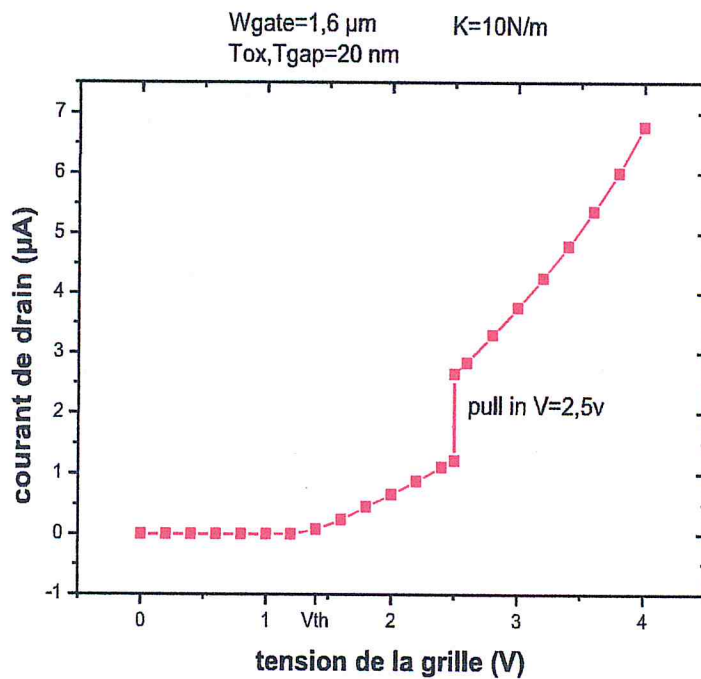


Figure (4.a.12) : I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur $1.6\mu\text{m}$

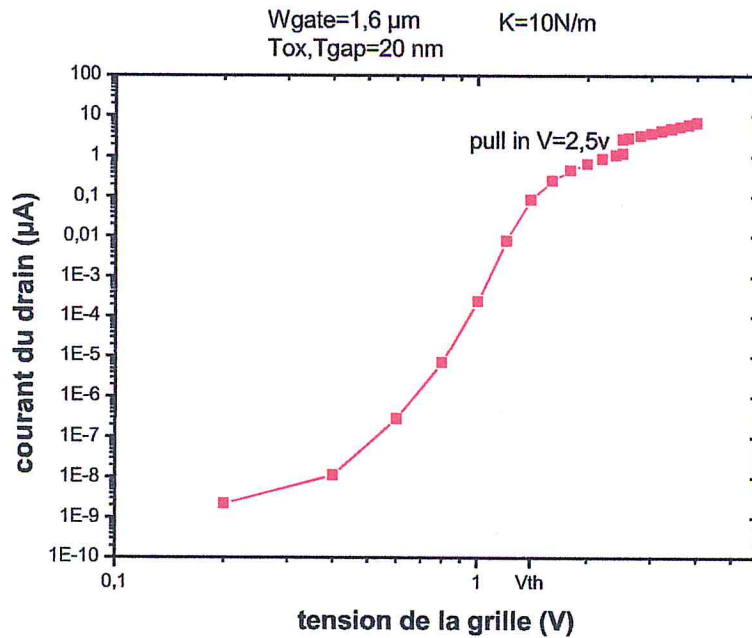


Figure (4.a.12) : I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur 1.6 μ m en échelle logarithmique

Dans ce cas on a une tension de *pull in* $V_{pi}=2.5V$ et la tension de seuil $V_{th}=1.4V$ donc on aura un saut après l'inversion.

VI. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a montré les résultats de la simulation SG-MOSFET qui relie l'effet de l'état solide du MOSFET et la vibration du micro-pont ,en utilisant le logiciel COMSOL et on a utilisé un model 2D, qui couple la physique des semiconducteur et l'électrostatique, malheureusement on a pas pu coupler la physiques de semiconducteur avec l'électromécaniques directement mais nous avons réussi a implanté les résultats d'électromécanique dans la simulation qui couple la physique des semiconducteurs avec l'électrostatique et nous avons trouvé des résultats de simulation similaires aux résultats analytiques , nous avons pu alors simuler un SG-MOSFET, d'épaisseur d'oxyde 20 nm avec 3 valeurs de *pull in* différentes

CONCLUSION GENERALE

Ce travail consiste à faire l'étude d'une structure micrométrique Pour cette étude notre choix s'est portée sur une structure micrométrique de type transistor SG-MOSFET L'un des domaines d'actualité dans la physique appliquée et le domaine des microsystèmes pour les applications des capteurs, mémoires et interrupteurs.

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire et effectué par le simulateur numérique *comsol multiphysique* qui utilisant la méthode des éléments finis.

Ces dernières décennies le transistor *MOSFET* a évolué à grande vitesse grâce à l'industrie de la microélectronique qui a permis l'évolution de ce dispositif ainsi que les circuits dans lesquelles ce dernier est intégré.

Nous avant d'abord rappelé les notions de bases sur les transistors à effet de champ de type *MOS* et leur mode de fonctionnement. Présenté ces deux type *MOS* type N et *MOS* de type P Nous avons passé en revue les principales caractéristiques des transistors *MOS*, ainsi que les différents paramètres qui influent sur leur fonctionnement, après avoir Présenté les étapes de la micro fabrication sur un exemple de fabrication d'un transistor *MOS* de type N. Dans ce chapitre, nous avons passé en revue l'ensemble des mémoires, volatiles et non-volatiles, et comment appliquer un transistor *MOS* dans le domaine des mémoires et aussi comme un résonateur et même il est même compatible pour une application d'un capteur de gaz et l'évolution de capteur a base de *MOSFET* a capteur d'uns structure SG-MOSFET

En deuxième lieu nous avant présenté Une architecture de SG-MOSFET, qui combine un transistor *MOS* et une grille en métal ou poly silicium suspendu, Un modèle analytique pour le transistor à fibre suspendue est présenté (*SG-FET*), Le modèle est analytique et exprime la tension de traction, la tension de retrait et la plage de déplacement de la grille en fonction des paramètres structurales. La position de la grille est exprimée en fonction de la tension de grille, permettant ainsi une intégration des relations *SG-FET* analytiques dans les modèles *MOSFET* standard. À partir du nouveau modèle *SG-FET*, ont discuté l'influence de l'hystérésis mécanique sur le comportement de l'état stationnaire, ont exprimé la position de la grille en fonction de la tension de la grille appliquée.

A la fin et après avoir simulé la géométrie en 2D en utilisant *comsol* multiphysique, nous avons discuté les différents résultats avec différentes longueur de grille suspendue.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ismail Bouhada « Elaboration et réalisation de transistors a effet de Champ a canal microfluidique intègre dédiés à la détection en milieu liquide » Thèse de doctorat, université de Rennes 1; 2014
- [2] Nicolas Abelé "Design and Fabrication of Suspended Gate mosfets for MEMS Resonator, Switch and Memory Applications" Thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de lausanne, 2007
- [3] zedek Rezika « Etude d'un transistor organique transparent avec pmma comme isolant de grille » Thèse de magister université mouloud mammeri tizi-ouzou
- [4] https://microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/index_chap11.html
- [5] Jérôme Saint-Martin « Etude par simulation monte carlo d'architectures de mosfet ultracourts a grille multiple sur soi » Thèse de doctorat, de l'université paris xi orsay ; 2005.
- [6] Juliano Razafndramora « 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, université de provence (aix-marseille I) 2004
- [7] Sandrine Bernardini « modelisation des structures metal-oxyde semiconducteur (mos) : applications aux dispositifs memoires » Thèse de doctorat, université de provence (aix-marseille i) 2004
- [8] laterally movable gate field effect transistor (lmgfet) for microsensor and microactuator applications par « In-hyounk Song B.S., sunmoon University, Korea, 1995, M.S., Louisiana State University, 2002»
- [9] A. Selvakumar, n. Yazdi, and k. Najafi, "a low power, wide range threshold acceleration sensing system," in proc. IEEE micro electro mechanical systems workshop (MEMS'96), San Diego, Feb. 1996, CA, pp. 186-191.
- [10] H.C. Nathanson, W.E. Newell, R.A. Wickstrom and J.R. Davis Jr., "The resonant gate transistor," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-14(3), pp. 117-133, 1967.
- [11] D.M. Edmans, A. Gutierrez, C. Cormeau, E. Maby and H. Kaufman, "Micromachined accelerometer with a movable gate transistor sensing element." Proc. of SPIE, vol. 3224, pp. 37-46, 1997.
- [12] J. A. Plaza, m.a. benitez, j. Esteve, and e. Lora-tamayo, "new fet accelerometer based on surface micromachining," sensors and actuators A 61 pp. 342-345,

1997.

- [13] Y. yee, j.u. bu, k. Chun and j-w. Lee, "an integrated digital silicon microaccelerometer with mosfet-type sensing elements," *j. Micromech. Microeng.*, vol. 10, pp. 350-358, 2000.
- [14] J.W. Kang and K. Simonette, "Surface micromachined multi-layer moving gate field effect transistor (mogfet) pressure switch with integrated vacuum scaled cavity," *Proc. 12th IEEE Intl. Conf. On mems*, Orlando, FL, Jan. 17-21, 1999, pp. 499-504.
- [15] T. Yoshida, t. Kudo and s. Kato, "strain sensitive resonant gate transistor," *iee mems*, pp. 316-321, 1995.
- [16] A. Weinert and g.i. andersson, "high resolution resonant double gate transistor for oscillating structures," *sensors and actuators a 90*, pp. 20-30, 2001.
- [17] Analytical Modeling of the Suspended-Gate FET and Design Insights for Low-Power Logic Kerem Akarvardar, Christoph Eggimann, Dimitrios Tsamados, Yogesh Singh Chauhan, Gordon C. Wan, Adrian Mihai Ionescu, Senior Member, *iee*, Roger T. Howe, Fellow, *iee*, and H.-S. Philip Wong, Fellow, *iee*
- [18] N. Abele, r. Fritschi, k. Boucart, f. Casset, p. Ancey, and a. M. Ionescu, "suspended-gate mosfet: bringing new mems functionality into solid-state mos transistor," in *iedm tech. Dig.*, 2005, pp. 479–481.
- [19] S. Frederico, c. Hibert, r. Fritschi, p. Fluckiger, p. Renaud, and a. M. Ionescu, "silicon sacrificial layer dry etching (sslide) for freestanding rf mems architectures," in *proc. lee int. Conf.mems*, 2003, pp. 570–573.
- [20] M. K. Tripp, c. Stampfer, d. C. Miller, t. Helbling, c. F. Hermann, c. Hierold, k. Gall, s. M. George, and v. M. Bright, "the mechanical properties of atomic layer deposited alumina for use in micro- and nanoelectromechanical systems," *sens. Actuators a, phys.*, vol. 130, pp. 419–429, aug. 2006.
- [21] A. M. Ionescu, v. Pott, r. Fritschi, k. Banerjee, m. J. Declerq, p. Renaud, c. Hibert, p. Fluckiger, and g. A. Racine, "modeling and design of a low-voltage soi suspended-gate mosfet (sg-mosfet) with a metalover- gate architecture," in *proc. Isqed*, 2002, pp. 496–501
- [22] G. M. Rebeiz, *rf mems: theory, design, and technology*. Hoboken, nj: wiley, 2003.
- [23] J. Muldavin and g. M. Rebeiz, "high isolation cpw mems shunt switches—part i: modeling," *iee trans. Microw. Theory tech.*, vol. 48, no. 6, pp. 1045–1052, jun. 2000.

- [24] E. K. Chan and r. W. Dutton, "electrostatic micromechanical actuator with extended range of travel," *j. Microelectromech. Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 321–328, sep. 2000.
- [25] MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis and Applications, J. G. Korvink and O. Paul, Eds. Norwich, ny: William Andrew, 2006, ch. 14.
- [26] H. Kam, d. T. Lee, r. T. Howe, and t.-j. King, "a new nano electromechanical field effect transistor (nemfet) design for low-power electronics," in *iedm tech. Dig.*, 2005, pp. 463–466.
- [27] L. L. Mercado, s.-m. Kuo, t.-y. T. Lee, and I. Liu, "mechanics-based solutions to rf mems switch stiction problem," *ieee trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 560–567, sep. 2004.
- [28] N. Abele, k. Segueni, k. Boucart, f. Casset, b. Legrand, I. Buchailot, p. Ancey, and a. M. Ionescu, "ultra-low voltage mems resonator based on rsg-mosfet," in *proc. leee int. Conf. Mems*, 2006, pp. 882–885.
- [29] F. W. Delrio, m. P. De boer, j. A. Knapp, e. D. Reedy, jr., p. J. Clews, andm. L. Dunn, "the role of van derwaals forces in adhesion of micromachined surfaces," *nat. Mater.*, vol. 4, no. 8, pp. 629–634, 2005.
- [30] J. A. Knapp and m. P. De boer, "mechanics of microcantilever beams subject to combined electrostatic and adhesive forces," *j. Microelectromech. Syst.*, vol. 11, no. 6, pp. 754–764, dec. 2002.
- [31] N. Abele, a. Villaret, a. Gangadharaiah, c. Gabioud, p. Ancey, and a. M. Ionescu, "1t mems memory based on suspended gate mosfet," in *iedm tech. Dig.*, 2006, pp. 509–512.
- [32] G. Salvatore, d. Bouvet, and a.m. ionescu, "advanced 1tmemmemory cell architectures," internal research report, 2007. Integrated project minami.
- [33] Y. Tsvividis, operation and modeling of the mos transistor, 2nd ed.new york: mcgraw-hill, 1999.
- [34] <https://www.comsol.fr/comsol-multiphysics>
- [35] Comsol multiphysics user guide 5.2
- [36] Nadir B. Conception,modelisation et simulation a éléments finis d'un capteur MEMS a microdebit a base de pdms piezoresistive pour les systèmes microfluidique . Thèse de doctorat Université de blida1 2016
- [37] comsol Multiphysics example "dc Characteristics of a mos Transistor (MOSFET)" model, version 5.2.

- [38] J. R. Clark, w.-t. Hsu and c. t.-c. Nguyen, « Measurement techniques for capacitively transduced vhf-to-uhf micromechanical resonators », in the International Conference on Solid-State Sensors & Actuators (Transducers) Technical Digest, Munich, Germany, June, 10-14, 2001, pp. 1118-1121
- [39] Yosri ayadi « intégration 3d de dispositifs set dans le back-end-of-line en technologies cmos 28 nm pour le développement de capteurs ultra basse consommation » Thèse de doctorat, université Sherbrooke (Québec) Canada 2016
- [40] Senft C, Iskra P, Eisele I (2012) Theory and Application of Suspended Gate fet Gas Sensors. In: Fleischer M, Lehmann M (eds) Solid State Gas Sens. - Ind. Appl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 79–112
- [41] Wilbertz C, Frerichs H-P, Freund I, Lehmann M (2005) Suspended-Gate- and Lundstrom-fet integrated on a cmos-chip. Sens Actuators Phys 123–124:2–6. doi: 10.1016/j.sna.2005.03.042
- [42] Karthigeyan A, Gupta RP, Scharnagl K, et al (2002) A room temperature hsgfet ammonia sensor based on iridium oxide thin film. Sens Actuators B Chem 85:145–153. doi: 10.1016/S0925-4005(02)00073-4
- [43] Cédric durand « Développement de résonateurs électromécaniques en technologie Silicon On Nothing, à détection capacitive et amplifiée par transistor mos, en vue d'une co-intégration permettant d'adresser une application de référence de temps » Thèse de doctorat, Universit_e des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2009
- [44] <http://www.ssplprints.com/image/95002/white-ron-first-working-transistor-1947>
- [45] <https://www.irif.fr/~carton/Enseignement/Architecture/Cours/Gates>
- [46] zedek Rezika « Etude d'un transistor organique transparent avec pmma comme isolant de grille » Thèse de magister université mouloud mammeri tizi-ouzou
- [47] <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transistor/index.html>
- [48] <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transistor/index.html>
- [49] <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transistor/index.html>
- [50] Jérôme Saint-Martin « Etude par simulation monte carlo d'architectures de mosfet ultracourts a grille multiple sur soi » Thèse de doctorat, de l'université paris xi orsay ; 2005.
- [51] zedek Rezika « Etude d'un transistor organique transparent avec pmma

comme isolant de grille » Thèse de magister université mouloud mammeri tizi-ouzou

- [52] Sandrine Bernardini « modelisation des structures metal-oxyde semiconducteur (mos) : applications aux dispositifs memoires » Thèse de doctorat, université de provence (aix-marseille i) 2004
- [53] Juliano Razafndramora « 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, université de provence (aix-marseille I) 2004
- [54] Sandrine Bernardini « modelisation des structures metal-oxyde semiconducteur (mos) : applications aux dispositifs memoires » Thèse de doctorat, université de provence (aix-marseille i) 2004
- [55] Sandrine Bernardini « modelisation des structures metal-oxyde semiconducteur (mos) : applications aux dispositifs memoires » Thèse de doctorat, université de provence (aix-marseille i) 2004
- [56] Sandrine Bernardini « modelisation des structures metal-oxyde semiconducteur (mos) : applications aux dispositifs memoires » Thèse de doctorat, université de provence (aix-marseille i) 2004
- [57] Nicolas Abelé "Design and Fabrication of Suspended Gate mosfets for MEMS Resonator, Switch and Memory Applications" Thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de lausanne, 2007
- [58] Cédric durand « Développement de résonateurs électromécaniques en technologie Silicon On Nothing, à détection capacitive et amplifiée par transistor mos, en vue d'une co-intégration permettant d'adresser une application de référence de temps » Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2009
- [59] Cédric durand « Développement de résonateurs électromécaniques en technologie Silicon On Nothing, à détection capacitive et amplifiée par transistor mos, en vue d'une co-intégration permettant d'adresser une application de référence de temps » Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2009
- [60] Yosri ayadi « intégration 3d de dispositifs set dans le back-end-of-line en technologies cmos 28 nm pour le développement de capteurs ultra basse consommation » Thèse de doctorat, université Sherbrooke (Québec) Canada 2016
- [61] Yosri ayadi « intégration 3d de dispositifs set dans le back-end-of-line en technologies cmos 28 nm pour le développement de capteurs ultra basse

consommation » Thèse de doctorat, université Sherbrooke (Québec) Canada 2016

- [62] Yosri ayadi « intégration 3d de dispositifs set dans le back-end-of-line en technologies cmos 28 nm pour le développement de capteurs ultra basse consommation » Thèse de doctorat, université Sherbrooke (Québec) Canada 2016
- [63] laterally movable gate field effect transistor (lmgfet) for microsensor and microactuator applications par « In-hyounk Song B.S., SunMoon University, Korea, 1995, M.S., Louisiana State University, 2002»
- [64] Senft C, Iskra P, Eisele I (2012) Theory and Application of Suspended Gate fet Gas Sensors. In: Fleischer M, Lehmann M (eds) Solid State Gas Sens. - Ind. Appl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 79–112
- [65] H.C. Nathanson, W.E. Newell, R.A. Wickstrom and J.R. Davis Jr., "The resonant gate transistor," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-14(3), pp. 117-133, 1967.
- [66] Analytical Modeling of the Suspended-Gate fet and Design Insights for Low-Power Logic Kerem Akarvardar, Christoph Eggimann, Dimitrios Tsamados, Yogesh Singh Chauhan, Gordon C. Wan, Adrian Mihai Ionescu, Senior Member, ieee, Roger T. Howe, Fellow, ieee, and H.-S. Philip Wong, Fellow, ieee
- [67] Analytical Modeling of the Suspended-Gate fet and Design Insights for Low-Power Logic Kerem Akarvardar, Christoph Eggimann, Dimitrios Tsamados, Yogesh Singh Chauhan, Gordon C. Wan, Adrian Mihai Ionescu, Senior Member, ieee, Roger T. Howe, Fellow, ieee, and H.-S. Philip Wong, Fellow, ieee
- [68] Analytical Modeling of the Suspended-Gate fet and Design Insights for Low-Power Logic Kerem Akarvardar, Christoph Eggimann, Dimitrios Tsamados, Yogesh Singh Chauhan, Gordon C. Wan, Adrian Mihai Ionescu, Senior Member, ieee, Roger T. Howe, Fellow, ieee, and H.-S. Philip Wong, Fellow, ieee
- [69] Analytical Modeling of the Suspended-Gate fet and Design Insights for Low-Power Logic Kerem Akarvardar, Christoph Eggimann, Dimitrios Tsamados, Yogesh Singh Chauhan, Gordon C. Wan, Adrian Mihai Ionescu, Senior Member, ieee, Roger T. Howe, Fellow, ieee, and H.-S. Philip Wong, Fellow, ieee

TABLE DES FIGURES

Chapitre1

Figure (1.1) premier transistor de type bipolaire par *William Bradford Shockley* en 1947 [44]

Figure (1.2) Vue schématique du transistor *MOS* de (type N) et (type P [45].

Figure (1.3) : différents types de canal pour un transistor *MOS*.
(a) à canal surfacique(b) à canal enter [46]

Figure (1.4): les étapes de la TECHNOLOGIE DE FABRICATION [47]

Figure (1.5): les premières étapes de POCEDE DE FABRICATION D'UN TRANSISTOR *MOS* CANAL N [48]

Figure (1.6): les étapes fondamentales de POCEDE DE FABRICATION D'UN TRANSISTOR *MOS* CANAL N [49]

Figure (1.7) : Principe de fonctionnement d'un transistor *MOS*. (a) Etat bloqué. (b) Etat passant [50]

Figure (1.8): Diagramme de bande d'une structure *MOS* à substrat de type P [51]

Figure (1.9) : Classification des principales mémoires *MOS* [52]

Figure (1.10) : Cellule mémoire *DRAM* à un transistor [53]

Figure (1.11) : Schématisation d'un point mémoire [54]

Figure (1.12) : Schéma équivalent de la cellule *EEPROM* composée du transistor d'état en série avec le transistor de sélection. [55]

Figure (1.13) a : Coupe *SEM* (*Scanning Electron Microscopy*) d'une mémoire de type *Flash*
b : schéma électrique équivalent faisant apparaître les différentes capacités [56]

Figure (1.14) : Prévisions de volumes du marché des mémoires à semiconducteurs pour les années 2000 et 2003. (Source : *Semiconductor Industry Association*) [57]

Figure (1.15) Schéma a) un résonant *SG-MOSFET* et b) section transversale du *SGMOSFET* [58]

Figure (1.16) : Schéma de montage pour les caractérisations électriques en mixage fréquentiel sur les résonateurs à détection capacitive [59]

Figure (1.17) : Réponses fréquentielles des signaux en différents points du circuit [60]

Figure (1.18) Vue schématique de a) un *SG-FET*, b) un *Pd-MOSFET*. [61]

Figure (1.19) Schéma d'une structure de capteur de gaz MOSFET à canal n avec une électrode de grille métallique catalytique [62]

Figure (1.20) Schéma du capteur de gaz SG-FET à canal n [63]

Chapitre 2

Figure (2.1) une vue schématique du FET a grille mobile verticalement. (a) Une géométrie pratique et des connexions de circuit. (B) Vue schématique du mouvement d'un FET a grille mobile verticalement [65]

Figure (2.2). SGFET N-Channel. (a) Structure 3D. (b) Section transversale parallèle à la longueur de l'appareil. (c) Circuit de condensateur équivalent. (d) Symbole [66]

Figure (2.3) a : Section transversale. (a) grille en haut ($V_{FB} < V_G < V_{pi}$; $t_{gap0} > x > x_{pi}$) [67].

Figure (2.3) b : Section transversal grille vers le bas ($V_G \geq V_{pi}$, $x = 0$). [68]

Figure (2.4) Modèle exact (numérique) par rapport au modèle analytique. (A) Variation du potentiel de surface en fonction de la tension de grille. (B) Variation de l'épaisseur d'espace normalisée en fonction de la tension de grille. $W = 650$ nm, $L = 100$ nm, $h = 10$ nm, $E = 170$ GPa (Si) ($k = 2$ N / m), $t_{gap0} = 10$ nm, $t_{ox} = 2$ nm (SiO₂), $NA = 3.1017$ cm⁻³, $V_{FB} = 0$, $\Gamma = 25$ μ J / m² et $D_0 = 0,2$ nm. Le modèle numérique se réfère aux solutions itératives de (3) et (12) et utilise l'équation de charge exacte avec des accepteurs, des trous et des électrons.[69]

Chapitre 3

Figure (3.1) structure du SG-MOSFET sur COMSOL

Figure (3.2) : structure de pont vibrant 2D

Figure (3.3) géométrie du pont vibrant dans COMSOL

Figure (3.4) : 1er régions du résonateur en poly-Si

Figure (3.5) : 2eme région du résonateur en Air

Figure (3.6) 3eme région du résonateur en Sio₂

Figure (3.7) : région de condition free deformation

Figure (3.8) : région de la condition Electrical Material Model

Figure (3.9) : région pour la condition Zero charge

Figure (3.10) région pour la condition Electromechanical Interface

Figure (3.11) région pour la condition Prescribed Mesh Displacement

Figure (3.12) : région pour la condition Initial Values

Figure (3.13) région pour la condition Linear Elastic Material

Figure (3.14) : région pour la condition Fixed Constraint

Figure (3.15) : région pour la condition Ground

Figure (3.16) : région pour la condition Electric Potential

Figure (3.17) : maillage quadrilatéral structure

Figure (3.18) : la géométrie du SG-MODFET dans COMSOL

Figure (3.19) : Domain de la physique Semiconductor semi

Figure (3.20) : Domain du matériau Si (transistor)

Figure (3.21) : Domain de l'oxyde du silicium

Figure (3.22) : Domain du poly-si (la grille suspendue)

Figure (3.23): Domain de l'air

Figure (3.24) : maillage triangle libre pour la structure du SG-FET

Chapitre 4

Figure (4.a.1) : I_d vs V_g d'un MOSFET d'épaisseur d'oxyde 5 nm

Figure (4.b.1) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un MOSFET d'épaisseur d'oxyde de 5 nm

Figure (4.a.2) : I_d vs V_g d'un MOSFET d'épaisseur d'oxyde de 10nm

Figure (4.b.2) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un MOSFET d'épaisseur d'oxyde de 10nm

Figure (4 a 3) : I_d vs V_g pour un MOSFET d'épaisseur d'oxyde de 20 nm

Figure (4.a.3) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un MOSFET d'épaisseur d'oxyde de 20 nm

Figure (4.a.4) : I_d vs V_g d'un MOSFET à gap d'épaisseur d'oxyde de 5 nm

Figure (4.b.4) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un MOSFET à gap d'épaisseur d'oxyde de 5 nm

Figure (4.a.5) : I_d vs V_g d'un MOSFET à gap d'épaisseur d'oxyde de 10nm

Figure (4.b.5) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un MOSFET à gap d'épaisseur d'oxyde de 10 nm

Figure (4.a.6) : I_d vs V_g d'un MOSFET à gap d'épaisseur d'oxyde de 20nm

Figure (4.b.6) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un MOSFET à gap d'épaisseur d'oxyde de 20 nm

Figure (4.a.7) : déflexion du résonateur en fonction de la tension

Figure (4.b.7) : changement dans le gap d'air en fonction de la tension

Figure (4.a.8) : déflexion du résonateur en fonction de la tension

Figure (4.b.8) : changement dans le gap d'air en fonction de la tension

Figure (4.a.9) : déflexion du résonateur en fonction de la tension

Figure (4.b.9) : changement dans le gap d'air en fonction de la tension

Figure (4.a.10) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur 3 μm

Figure (4.b.10) : I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une longueur de grille de 3 μm

Figure (4.a.11) : d' I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur 2 μm

Figure (4.b.11) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur 2 μm

Figure (4.a.12) : I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur 1.6 μm

Figure (4.a.12) : logarithmique d' I_d vs V_g d'un SG-MOSFET pour une grille de longueur 1.6 μm

Annexe A

Simulation du pont vibrant

Modeling Instructions

From the File menu, choose **New**.

NEW

1 In the New window, click **Model Wizard**.

MODEL WIZARD

1 In the Model Wizard window, click **2D**.

2 In the Select physics tree, select **Structural Mechanics>Electromechanics (emi)**.

3 Click **Add**.

4 Click **Study**.

5 In the Select study tree, select **Preset Studies>Stationary**.

6 Click **Done**.

GEOMETRY 1

1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)** click **Geometry 1**.

2 In the **Settings** window for Geometry, locate the **Units** section.

3 From the **Length** unit list, choose μm .

Rectangle 1 (r1)

1 On the **Geometry** toolbar, click **Primitives** and choose **Rectangle**.

2 In the **Settings** window for Rectangle, locate the **Size and Shape** section.

3 In the **Width** text field, type 3.

4 In the **Height** text field, type 0.02.

Rectangle 2 (r2)

1 On the **Geometry** toolbar, click **Primitives** and choose **Rectangle**.

2 In the **Settings** window for Rectangle, locate the **Size and Shape** section.

3 In the **Width** text field, type 3.

4 In the **Height** text field, type 0.02.

5 Locate the **Position** section. In the **y** text field, type -0.02.

Rectangle 3 (r3)

1 On the **Geometry** toolbar, click **Primitives** and choose **Rectangle**.

2 In the **Settings** window for Rectangle, locate the **Size and Shape** section.

3 In the **Width** text field, type **3**

4 In the **Height** text field, type **0.02**.

5 Locate the **Position** section. In the **y** text field, type **-0.04**.

ADD MATERIAL

1 On the **Home** toolbar, click **Add Material** to open the **Add Material** window.

2 Go to the **Add Material** window.

3 In the tree, select **MEMS>Semiconductors>Si - Polycrystalline Silicon**.

4 Click **Add to Component** in the window toolbar.

ADD MATERIAL

1 Go to the **Add Material** window.

2 In the tree, select **Built-In>Air**.

3 Click **Add to Component** in the window toolbar.

ADD MATERIAL

1 Go to the **Add Material** window.

2 In the tree, select **MEMS>insulators>SiO2-Silicon oxide**.

3 Click **Add to Component** in the window toolbar.

MATERIALS

Air (mat2)

1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)>Materials** click **Air (mat2)**.

2 Select **Domains 2** only.

Set the air material property to be non-solid, to ensure the interface solves the electrostatics equations in the spatial frame.

3 In the **Settings** window for Material, click to expand the **Material properties** section.

4 Locate the **Material Properties** section. From the **Material type** list, choose **Nonsolid**.

5 On the **Home** toolbar, click **Add Material** to close the **Add Material** window.

SiO2 (mat3)

1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)>Materials** click **SiO2(mat3)**.

2 Select Domains 1 only.

GLOBAL DEFINITIONS

Parameters

1 On the **Home** toolbar, click **Parameters**.

2 In the **Settings** window for Parameters, locate the **Parameters** section.

3 In the table, enter the following settings:

Name	Expression	Value
Vdc	0.1[V]	0.1 V

ELECTROMECHANICS (EMI)

Linear Elastic Material 1

1 On the **Physics** toolbar, click **Domains** and choose **Linear Elastic Material**.

2 Select Domains 3 only.

Fixed Constraint 1

1 On the **Physics** toolbar, click **Boundaries** and choose **Fixed Constraint**.

2 In the **Settings** window for Fixed Constraint, locate the **Boundary Selection** section.

3 Click **Paste Selection**.

4 In the **Paste Selection** dialog box, type **5,10** in the **Selection** text field.

5 Click **OK**.

Ground 1

1 On the **Physics** toolbar, click **Boundaries** and choose **Ground**.

2 In the **Settings** window for Ground, locate the **Boundary Selection** section.

3 Click **Paste Selection**.

4 In the **Paste Selection** dialog box, type **2** in the **Selection** text field.

5 Click **OK**.

Electric Potential 1

1 On the **Physics** toolbar, click **Boundaries** and choose **Electric Potential**.

2 In the **Settings** window for Electric Potential, locate the **Boundary Selection** section.

3 Click **Paste Selection**.

4 In the **Paste Selection** dialog box, type **6** in the **Selection** text field.

5 Click **OK**.

6 In the **Settings window** for Electric Potential, locate the **Electric Potential** section.

7 In the **V0** text field, type **Vdc**.

Fixed Mesh

1 On the **Physics** toolbar, click **Domains** and choose **deformed Mesh>Fixed Mesh**.

2 Select **Domains 1** only.

MESH 1

Mapped 1

In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)** right-click **Mesh 1** and choose **Mapped**.

Distribution 1

1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)>Mesh 1** right-click **Mapped 1** and choose **Distribution**.

2 In the **Settings** window for **Distribution**, locate the **Boundary Selection** section.

3 Click **Paste Selection**.

4 In the **Paste Selection** dialog box, type **8 9 10** in the **Selection** text field.

5 Click **OK**.

6 In the **Settings** window for **Distribution**, locate the **Distribution** section.

7 In the **Number of elements** text field, type **5**.

Distribution 2

1 Right-click **Mapped 1** and choose **Distribution**.

2 In the **Settings** window for **Distribution**, locate the **Boundary Selection** section.

3 Click **Paste Selection**.

4 In the **Paste Selection** dialog box, type **7** in the **Selection** text field.

5 Click **OK**.

6 In the **Settings** window for **Distribution**, locate the **Distribution** section.

7 In the **Number of elements** text field, type **15**.

8 Click the **Build All** button.

9 Click the **Zoom Extents** button on the **Graphics** toolbar.

Step 1: Stationary

- 1 In the **Settings window** for **Stationary**, click to expand the **Study extensions** section.
- 2 Locate the **Study Extensions** section. Select the **Auxiliary sweep** check box.
- 3 Click **Add**.
- 4 In the table, enter the following settings:

Parameter name	Parameter value list	Parameter unit
Vdc	range(0,0.1,0.7)	

- 5 On the **Home toolbar**, click **Compute**.

RESULTS

- 1 In the **Model Builder** window, under **Results** right-click **Displacement (emi)** and choose **Average –Line average**
- 2 In the **Settings window** for line average, locate the **Expression** section.
- 3 In the **Expression** text field, type **v** and for **units** choose **nm**.
- 4 In the **Settings window** for line average, locate the **Boundary Selection** section.
- 5 Click **Paste Selection**.
- 6 In the **Paste Selection** dialog box, type **6** in the **Selection** text field.
- 7 Click **Evaluate**.

Annexe B

Simulation du SG-MOSFET

Modeling Instructions

- 1 From the **File** menu, choose **application libraries**.
- 2 Select **semiconducteur >devices>mosfet**.
- 3 Click open **application**.

GLOBAL DEFINITIONS

Parameters

- 1 On the **Home** toolbar, click **Parameters**.
- 2 In the **Settings** window for Parameters, locate the **Parameters** section.
- 3 In the table, enter the following settings:

Name	Expression	Value
Vd	10[mV]	0.01 V
Vg	2[V]	2 V
gap	20[nm]	20 nm

GEOMETRY 1

Rectangle 1 (r1)

- 1 On the **Geometry** toolbar, click **Primitives** and choose **Rectangle**.
- 2 In the **Settings** window for Rectangle, locate the **Size** section.
- 3 In the **Width** text field, type 3.
- 4 In the **Height** text field, type 0.4.
- 5 Locate the **Position** section. In the **y** text field, type 0.7

Rectangle 2 (r2)

- 1 On the **Geometry** toolbar, click **Primitives** and choose **Rectangle**.
- 2 In the **Settings** window for Rectangle, locate the **Size** section.
- 3 In the **Width** text field, type 1.6.

4 In the **Height** text field, type 0.02.

5 Locate the **Position** section. In the **x** text field, type 0.7.

6 In the **y** text field, type 0.7.

Rectangle 3 (r3)

1 On the **Geometry** toolbar, click **Primitives** and choose **Rectangle**.

2 In the **Settings** window for Rectangle, locate the **Size and Shape** section.

3 In the **Width** text field, type 1.6.

4 In the **Height** text field, type 0.02.

5 Locate the **Position** section. In the **x** text field, type 0.7.

6 In the **y** text field, type **0.74+gap**.

MATERIALS

ADD MATERIAL

1 On the **Home** toolbar, click **Add Material** to open the **Add Material** window.

2 Go to the **Add Material** window.

3 In the tree, select **MEMS>Semiconductors>Si - Polycrystalline Silicon**.

4 Click **Add to Component** in the window toolbar.

ADD MATERIAL

1 Go to the **Add Material** window.

2 In the tree, select **Built-In>Air**.

3 Click **Add to Component** in the window toolbar.

ADD MATERIAL

1 Go to the **Add Material** window.

2 In the tree, select **MEMS>insulators>SiO2-Silicon oxide**.

3 Click **Add to Component** in the window toolbar.

Air (mat2)

1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)>Materials** click **Air (mat2)**.

2 Select Domains3 only.

SiO2 (mat3)

1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)**>**Materials** click **SiO2(mat3)**.

2 Select Domains 4 only.

Si-polycrystalline (mat4)

1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)**>**Materials** click **Si-poly(mat4)**.

2 Select Domains 5 only.

SEMICONDUCTOR (SEMI)

1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)** click **Semiconductor (semi)**.

2 In the **Settings** window for Semiconductor, locate the **domain selection** section.

3 From the **selection** list, delete the domain 5 and 3.

Metal Contact 1

1 Select Boundary 6 only.

Metal Contact 2

1 Select Boundary 18 only.

Thin Insulator Gate 1

1 On the **Physics** toolbar, right click on **Thin Insulator Gate** and choose delete.

2 On the **Physics** toolbar, click **Electrostatics** and choose **charge conservation**.

3 Select domain 4 only.

Terminal 1

1 On the **Physics** toolbar, click **Boundaries** and choose **terminal**.

2 In the **V0** text field, type **es.fp1.V0**.

ELECTROSTATICS (ES)

1 In the **Model Builder** window, right click on **Component 1 (comp1)** click **add physics** >and choose **electrostatics** from the list

2 In the **Settings** window for electrostatics, locate the **thickness** section.

3 From the **out of plan thickness** list, type **1e-6 m**.

Ground 1

- 1 On the **Physics toolbar**, click **Boundaries** and choose **Ground**.
- 2 In the **Settings window** for Ground, locate the **Boundary Selection** section.
- 3 Click **Paste Selection**.
- 4 In the **Paste Selection** dialog box, type **2** in the **Selection** text field.
- 5 Click **OK**.

Electric Potential 1

- 1 On the **Physics toolbar**, click **Boundaries** and choose **Electric Potential**.
- 2 In the **Settings window** for Electric Potential, locate the **Boundary Selection** section.
- 3 Click **Paste Selection**.
- 4 In the **Paste Selection** dialog box, type **12,13,14,17** in the **Selection** text field.
- 5 Click **OK**.

6 In the **Settings window** for Electric Potential, locate the **Electric Potential** section.

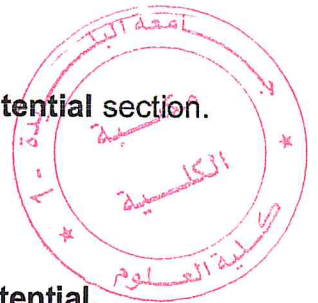
7 In the **V0** text field, type **Vg**.

Floating Potential 1

- 1 On the **Physics toolbar**, click **Boundaries** and choose **Floating potential**.
- 2 In the **Settings window** for floating potential, locate the **Boundary Selection** section.
- 3 Click **Paste Selection**.
- 4 In the **Paste Selection** dialog box, type **11** in the **Selection** text field.
- 5 Click **OK**.

STUDY 1

- 1 In the **Settings** window for Stationary, click to expand the **Study extensions** section.



2 Locate the **Study Extensions** section. Select the **Auxiliary sweep** check box.

3 From the **Sweep type** list, choose **specified combinations**.

4 Click **Add**.

For **Vd** add $0.01 \cdot 1^{\text{range}(1,9)}$

For **Vg** add $\text{range}(0,0.1,0.7)0.7$

For **gap** add results from annexe a

5 On the **Home** toolbar, click **Compute**.



