

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'Electronique

Mémoire de fin d'Etude de Master Académique

Filière : Génie Electrique
Option : Microélectronique

Thème :

Étude sur les nanomatériaux comme interconnexion dans les circuits intégrés

Présenté par

AID Nadir
BELAMINE Ghiles

Devant le jury composé de :

M ^{me} Hatem Djedjiga	Professeur	UMMTO	Présidente
M ^{me} Bouraba Fazia	Maitre de conférences 	UMMTO	Examinatrice
M ^{me} Nemmar Farida	Maitre de conférences 	UMMTO	Encadreur

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, pour le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce le bon DIEU ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons ainsi à exprimer nos immenses remerciements et notre profonde gratitude à Dr. NEMMAR Farida pour ses conseils précieux, les orientations, et l'aide qu'elle nous ont accordé pour mener ce travail à terme.

On adresse également nous sincères remerciements pour nous parents pour leurs soutiens, leurs encouragements, leurs patiences et leurs motivations tout au long de notre cursus.

Nous remercions également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail :

Mme : Professeur HATEM Dedjiga, la Présidente.

Mme Maître de conférences BOURABA Fazia, l'Examinatrice.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants le département de génie électrique de l'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Enfin, nous voudrions associer nos remerciements à toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. A ce jeu, il est impossible de ne pas oublier des noms. On voudrait présenter d'avance nos excuses à ceux qui pourraient alors subir les affres de l'oubli.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à

Mes parents Dont le soutien inconditionnel

Et les encouragements

À mes professeurs et mentors pour leur guidance précieuse et leurs enseignements inspirants qui ont enrichi ma compréhension et ma passion pour ce domaine

Enfin, à mes amis

En particulier à mon binôme Nadir qui ont partagé avec moi les joies et les défis de cette aventure

Ghiles

Mes dédicaces pour...

A mes chers parents

A mon frère et à ma sœur

A mes amis

Nadir

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	12
Liste des tableaux	14
Introduction général	18
Chapitre I Etat de l'art sur les nanomatériaux pour les interconnexions dans les circuits intégrés	
I.Introduction.....	21
II.Définition et classification des nanomatériaux.....	21
II.1.Définition.....	21
II.2.Type des nanomatériaux.....	21
III.Types de nanomatériaux utilisés pour interconnexions des circuits intégrés.....	23
III.1 Nanotubes de carbone.....	23
III.2 Graphene.....	25
III.3.Nano fils de cuivre.....	27
III.3.1.Types de nano fils de cuivre.....	27
III.4.Nano fils de silicium.....	28
III.4.1.Avantage des nano fils de silicium.....	29
III.4.2.Types de nano fils de silicium.....	29
IV.Propriétés des Nanomatériaux et leurs applications.....	29
IV.1.Nanomatériaux à base de carbone.....	29
IV.1.1.Nanotubes de Carbone (NTC).....	29
IV.1.2.le graphene (NTC).....	32
IV.1.2.1.Propriété des nanoruban de graphène	32
IV.1.2.2.Applications.....	33
IV.1.2.3.Autres Applications Innovantes.....	33
IV.1.3.Nano fils de cuivres.....	34
IV.1.3.1.Propriétés des nano fils de cuivre.....	34.
IV.1.3.2.Applications.....	34.
IV.1.4.Nano fils de silicium.....	34

IV.1.4.1. Propriétés des nano fils de Silicium.....	34
IV.1.4.3. Autres applications.....	35
IV.1.4.2. Applications.....	35
Conclusion.....	37

Chapitre II Méthodes de synthèse et applications

I. Introduction.....	39
II. Les méthodes de synthèse.....	39
II.1 Nanomatériaux à base de carbone.....	39
II.1.1. Les nanotubes de carbone.....	39
II.1.2. Graphène.....	41
II.2. Nano fils de cuivre.....	43
II.3. Nanofils de silicium.....	46
III. Techniques de caractérisations.....	47
III.1 Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....	47
III.2 Microscopie Électronique à Transmission (MET).....	49
III.3 Microscopie à Force Atomique (AFM).....	52
III.4 Spectroscopie d'impédance.....	55
III.4.1 Équipements utilisés.....	56
III.4.2. Principes de fonctionnement.....	56
III.4.3. Avantages et limitation.....	57
IV. Conclusion.....	58

Chapitre III Étude de modèle et application des nanomatériaux dans les interconnexions circuits intégrés

I. Introduction.....	60
II. Types d'interconnexions dans les circuits intégrés.....	60
III .Application des nanomatériaux dans les interconnexions.....	60
III.1. Application du cuivre sous forme de nanomatériaux.....	60
III.1.2. Barrière de diffusion.....	62
III.1.3 Diffusion surfacique.....	63

III.1.4	Effet de la température	64
III.1.5	Estimation de la capacité d'interconnexion.....	65
III.1.6	L'inductance d'interconnexion.....	69.
III.1.7	Effet en haute fréquence	70
III.2.	Application des matériaux en carbones	71
III.2.1.	Les nanotubes de carbones.....	71
III.2.1.1.	Nanotubes de carbones monoparois SWNCT.....	71
III.2.1.2.	Nanotube de carbon multiparois MWCNT.....	73
III.2.1.2.1.	Modélisation des canaux conducteurs.....	74
III.2.1.2.2	Résistance d'une coque.....	75
III.2.1.2.3	L'inductance monocoque.....	75
III.2.1.2.4.	La capacité d'une seul coque	76
III.2.1.2.5.	Equivalence RLC dans les NTCs multiparois.....	76
III.2.1.3.	Faisceau SWCNT.....	77
III.2.1.3.1.	La résistance d'un faisceau.....	78
III.2.1.3.2.	L'inductance d'un faisceau	78
III.2.1.3.4.	La capacité d'un faisceau.....	79
III.2.1.4.	Les Faisceau de MWCNT	80
III.2.2.	L'application des nanorubans de graphène.....	80
IV.	Analyse et discussion.....	84
V.	Conclusion.....	84
Chapitre IV Les nanomatériaux et leurs fiabilités dans interconnexions des circuits intégrés		
I.	Introduction.....	86
II.	L'électromigration.....	86
II.1	Description du phénomène d'électromigration.....	86
II.2.	Les facteurs et mécanismes du phénomène d'électromigration.....	87
II.2.1	La densité de courant	87
II.2.2	L'effet de la température	87
II.2	Comportement des nanomatériaux et d'électromigration.....	88

II.2.1	La fiabilité du cuivre.....	89
II.2.2	Electromigration sous les caractéristiques de courant DC.....	89
II.2.3	Electromigration sous les caractéristiques du courant AC bipolaire.....	89
II.2.4	Electromigration sous les caractéristiques de courant pulse DC.....	91
II.3.	Méthodes pour améliorer la fiabilité EM de l'interconnexion.....	91
II.3.1.	Interconnexions composite hybride Cuivre-nanotubes de carbones.....	91
II.3.2.	Revêtement du substrat.....	94
II.3.3.	Interconnexions multicouches encapsulées.....	94
II.3.4.	Mise en place d'une couche mince en Or.....	94
II.3.5.	Techniques de dépôt.....	94
III.	La corrosion.....	94
III.1	Description.....	94
III.2	Mesures de fiabilité, de la température et d'humidité.....	96
III.3	Etude de la corrosion des conducteurs Aluminium Cuivre.....	97
III.4	Prévention de la corrosion.....	98
III.5	les nanomatériaux et interconnexion dans les circuits intégrés	98
IV.	Analyses et discussion	99
V.	Conclusion.....	99
	Conclusion général.....	102
	Référence bibliographiques.....	103
	Glossaire.....	113

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: (a) Cross-sectional view of an IC showing CNT-based interconnects and devices; (b) illustration of cross sections of hierarchical scaling depicting different inter-connect levels in MPU (left) and ASIC (right).

Figure I.2 : Vue en microscopie électronique en transmission (TEM) de nanoparticules de silice mésoporeuse, avec des diamètres de 20 nm (a), 45 nm (b), et 80 nm (c). Les nanostructures.

Figure I.3: illustration de nano structure réaliser par spectroscopie Raman.

Figure I.4: Classification of carbon nano-allotropes.

Figure I.5 : Allotropes du carbone.

Figure I.6 : Nano fils de carbones.

Figure I.8: (a) Schematic diagram of a C_{60} molecule; (b) a TEM image of a multi- walled carbon nanotube; (c) Minimum energy structure of a double- walled carbon nanotube; (d) electron diffraction pattern of a multi- walled carbon nanotube.

Figure I.9: Schéma de principe d'une feuille de graphène avec des vecteurs chiraux communs. b SWCNT en zigzag, chiral et fauteuil avec différents angles chiraux.

Figure I.10: structure du Graphene du carbone.

Figure I.11 : Nano fils de cuivres, alternative souple et bon marché à l'ITO(Indium Tin Oxide).

Figure I.12 : (a) Représentation schématique de la croissance VLS des nano fils du Si montrant l'état au début et à la fin de croissance. (b) Image MEB du premier nano fil de Silicium.

Chapitre II

Figure II.1 a) Représentation schématique d'un appareil à décharge d'arc. b) Mise en place expérimentale de la décharge d'arc dans l'azote liquide.

Figure II. 2 : Synthèse du graphène par diverses méthodes laser. Formation de graphène par (a) pulvérisation laser pulsée d'une cible en graphite, (b) conversion induite par laser de A-C en graphène, (c) décomposition SiC assistée par laser, (d) décomposition CH 4 assistée par laser, (e) décompression CNT avec un laser, (f) exfoliation laser, (g) réduction de l'oxyde de graphène avec un laser, et (h) décomposition assistée par laser du PMMA.

Figure II.3 : Exfoliation du graphène : (A) photographie en lumière blanche d'un film de plusieurs plans de graphène (épaisseur ~ 3 nm) déposé sur un substrat de Si oxydé. Images AFM (B) d'une aire de $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ proche du bord de ce film et (C) d'un seul plan de graphène.

Figure II :4 : Processus de synthèse et transfert pour des films à grande échelle obtenus en croissance par CVD.

Figure I:5 : Schéma du microscope électronique à balayage.

Figure I.6 : Schéma du microscope électronique à transmission conventionnel (TEM) [34].

Figure II.7: Atomic Force Microscope (AFM) [38].

Figure I.8 : les différents modes d'AFM.

Figure II.9 : Montage utilisé pour la mesure de la conductivité par spectroscopie d'impédance complexe.

Chapitre III

Figure III.1 La géométrie de l'interconnexion a base de cuivre,[57].

Figure III.2 Coupe transversale d'une interconnexion en cuivre montrant une couche barrière et un bombage en cuivre.[57].

Figure III.3 Illustrations schématiques des diffusions à la surface et aux joints de grains [57].

Figure III.4 Vues simplifiées de six interconnexions sur trois niveaux différents, proches les unes des autres [57].

Figure III.5 Segment d'interconnexion parallèle à la surface, utilisé pour les estimations de résistance parasite et de capacité.[57]

Figure III.6 Effet des champs marginaux sur la capacité. [57]

Figure III.7 Modèle de capacité Yuan et Trick incluant les champs marginaux.[57]

Figure III.8 Flux de courant déterminé par la profondeur de la peau.[57]

Figure III.9 Modèle de ligne de transmission d'un CNT isolé.[58]

Figure III.10 CNT sur un plan de masse [58]

Figure III.11 MWCNT sur un plan au sol [58]

Figure III.12 Circuit équivalent d'un MWCNT ayant v nombre de coques [58]

Figure III.13 Structure d'interconnexion utilisant le faisceau SWCNT [58]

Figure III.14 Structure d'interconnexion utilisant le faisceau MWCNT [58]

Figure III.15 Structure de nid d'abeille d'une feuille de graphène [58]

Figure III.16 Structure des nanorubans de Graphene multicouche.[58]

Figure III.17 Schéma du modèle d'interconnexion RLC de l'interconnexion GNR [58]

Chapitre IV

Figure IV.1 Graphiques d'Arrhenius de MTF versus $1000/T$ pour Cu, Al 4 %Cu/TiW et Al-2 %Si interconnexions sous un courant continu de densité $= 1,5 \times 10^7$ A/cm² [64]

Figure IV.2 Résistance normalisée pour Cu interconnexions en fonction du temps sous un courant DC densité de $1,5 \times 10^7$ A/cm² et sous un 1 MHz courant bipolaire de densité de courant de crête $= 1,5 \times 10^7$ A/cm² à 275°C.[64]

Figure IV.3 Dépendances de MTF sur fréquence pour Cu, Al-4%Cu/TiW et Al-2%Si interconnexions sous courant DC pulsé avec une densité de courant de pointe = $1,5 \times 10^6$ A/cm² à 275°C[64]

Figure IV.4 Résistance normalisée pour Cu interconnexions en fonction du temps sous basse fréquence courant bipolaire de densité de courant maximale = $9,0 \times 10^6$ A/cm² à 275°C. [64]

Figure IV.5 Tracé de t_{50} vs $1/T$ pour les lignes composites Cu et Cu/CNT de 2 μ m de large,[65]

Figure IV.6 Images MEB descendantes avec retrait du convercle a-SiC_xN_yH_z par FIB : (a) Cu et (b) Ligne composite Cu/CNT, respectivement. [65]

Figure IV.7 Images de MEB descendantes le long de l'extrémité cathodique de l'EM M2[65]

Figure IV.8Schéma de la vue de dessus des structures utilisées dans les études de corrosion THV. [72]

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Quelques propriétés mécaniques des nanotubes de carbone [4].

Tableau I.2 : Résistivités et conductivités électriques de quelques matériaux à 300 K [5].

Tableau I.3 : Conductivités thermiques à 300 K des allotropes du carbone en comparaison à celles de quelques matériaux [5]

Tableau I.4 : Applications des nanotechnologies et des nanomatériaux en fonction des secteurs d'activité

Tableau III.1 Dimensions des interconnexions et paramètres structurels des interconnexions à base de cuivre avec une technologie 32 nm. [57]

Tableau IV.1 Dépendance du temps moyen jusqu'à défaillance sur la densité de courant pour trois types de conducteurs à film d'aluminium ayant une section transversale de 10^{-7} cm² et à une température de 160°C (Dérivé à partir des données de référence [64])

Liste des acronymes et abréviations

Liste des acronymes et abréviations

CI	Circuit Intégré
CNT	Nanotubes de Carbone
SWCNT	Nanotubes de Carbone à Paroi Simple
MWCNT	Nanotubes de Carbone à Parois Multiples
GNP	Nano Plaquettes de Graphène
GO	Oxyde de Graphène
SLG	Graphène Monocouche (Single Layer Graphene)
FLG	Graphène à quelques couches (Few Layer Graphene)
MLG	Graphène Multicouche (Multi-Layer Graphene)
GNP	Nano plaquettes de Graphène (Graphene Nanoplatelets)
GO	Oxyde de Graphène (Graphene Oxide)
Cu	Symbole chimique du cuivre
VLS	Méthode de croissance Vapeur-Liquide-Solide (Vapor-Liquid-Solid growth)
NTC	Nanotubes de Carbone
DWNT :	Nanotubes de Carbone Double-Feuilles (Double-Walled Carbon Nanotubes)
AFM :	Microscope à Force Atomique (Atomic Force Microscope)
CVD	Dépôt Chimique en Phase Vapeur (Chemical Vapor Deposition)
SiC	Carbure de Silicium (Silicon Carbide)
PECVD	Dépôt Chimique en Phase Vapeur Assisté par Plasma (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition)
VLS	Vapor-Liquid-Solid
MEB	Microscopie Électronique à Balayage (Scanning Electron Microscopy)
DRX	Diffraction des Rayons X (X-Ray Diffraction)
SiH ₄	Silane (un précurseur gazeux de silicium)
MEB	Microscopie Électronique à Balayage (Scanning Electron Microscopy)
SEM	Microscopie Électronique à Balayage (Scanning Electron Microscopy)
DC	Courant Continu (Direct Current)
AC :	Courant Alternatif (Alternating Current)

SIE	Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (Electrochemical Impedance Spectroscopy)
RLC	Résistance, Inductance, Capacité (Resistance, Inductance, Capacitance)
PEEC	Partialement équivalent circuit
ρ	la résistivité
μ	la mobilité
2DBioFET	biosensor based on system-integrated two-dimensional field-effect transistors
EM	Electromigration
Si	Silicium
ULSI	Ultra Large-Scale Integration
ASIC	Application-specific integrated circuit
FET	Field effect transistor
Ti	Titane
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapour Deposition
AL	Aluminium

Introduction générale

Introduction générale

L'électronique représente l'un des piliers solides de notre société moderne, car elle touche bien à tous les aspects de notre vie quotidienne. Des appareils présents à la portée de chaque individu aux quatre coins du monde tels que les Smartphones, les ordinateurs et bien des systèmes embarqués utilisés dans plusieurs domaines entre agronomie et biologie, la construction mécanique et dans la médecine et bien d'autres domaines tels que l'équipement militaire. La base de cette technologie qui a révolutionné notre siècle présent sont bien les microprocesseurs, qui se définissent étant des circuits intégrés (CI) qui fonctionnent comme le cerveau d'un système embarqué. Il exécute des instructions programmées, effectue des calculs et gère les opérations logiques.

Les microprocesseurs sont conçus pour traiter des données binaires et sont composés de millions, voire de milliards, de transistors miniaturisés, permettant ainsi une grande puissance de calcul dans un espace réduit voire 5 ou 6 fois la population du monde de transistors dans un petit boîtier de 2 cm de surface on nomme bien la nanotechnologie, comme HAROLD KROTO définie cette technologie (Kroto, H. W., Curl, R. F., & Smalley, R. E. - *The discovery of fullerenes*. Nobel Prize in Chemistry 1996. NobelPrize.org) c'est l'assemblage atome par atome molécule par molécule pour créer des structures complexes.

Un circuit intégré, également appelé puce électronique, est un composant électronique qui regroupe plusieurs fonctions électroniques sur un seul substrat en matériau semi-conducteur, généralement du silicium. Contrairement aux circuits discrets, où chaque composant est séparé et interconnecté par des fils externes, un circuit intégré intègre tous les composants nécessaires (transistors, résistances, capacités, etc.) sont interconnectés et assurent la communication entre les transistors, les résistances, et les capacités intégrées sur le même substrat formant un réseau de conductions complexes.

Ces interconnexions des circuits intégrés de nos jours traditionnels sont réalisés à base de cuivre (Cu^{29}) et l'aluminium (Al^{13}), cependant ses réseaux avec la miniaturisation progressive, des problèmes sont rencontrés et prennent l'échec à la fabrication par des défaillances, et atteignent leurs limites.

Parmi les majeurs problèmes, le couplage capacitifs et inductifs entre les lignes de réseaux qui génère des interférences électromagnétiques, aussi un autre phénomène d'électromigration qui entraîne des défaillances prématurées des circuits par transport de la matière par le passage du courant entre interconnexions. Avec la course à la miniaturisation, des dégradations de performances sont rencontrées dû au fait de l'augmentation de la résistance et de la capacitance ce qui a amené la recherche à s'orienter vers de nouveaux matériaux.

L'utilisation des nanomatériaux dans les interconnexions des circuits intégrés est une voie prometteuse pour réduire la consommation d'énergie, la taille des composants, ainsi que le phénomène de l'électromigration. Ces matériaux présentent une bonne conductivité électrique

et thermique et une haute résistivité mécanique, ce qui leur permet d'assurer des interconnexions d'une meilleure fiabilité.

Ce mémoire propose d'étudier l'apport des nanomatériaux pour relever les défis posés par les interconnexions des circuits intégrés traditionnelles. Après avoir rappelé les enjeux liés à la miniaturisation des interconnexions, nous analyserons les propriétés des nanomatériaux et leur potentiel pour améliorer les performances et la fiabilité des circuits intégrés. Enfin, nous explorerons les perspectives offertes par ces nouveaux matériaux pour l'avenir de l'électronique

**Chapitre I Etat de l'art sur les
nanomatériaux pour les
interconnexions dans les circuits
intégrés**

I. Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une projection sur les nanomatériaux, leurs utilisations, et évoquer les différentes propriétés de chaque matériaux leur classification, tous en insistant sur l'élément du carbone qui représente le noyau du sujet et que cet élément est abondant dans diverses technologies pour la prochaine génération.

Nous explorerons ces matériaux sous la vision de l'infiniment petit, leurs propriétés leurs avantages, et leurs classifications.

II. Définition et classification des nanomatériaux

II.1 Définition

Les nanomatériaux sont définis comme étant chaque matériau dont la structure est entre 1 et 100 nm de dimension, et se distinguent par des propriétés uniques qui les rendent particulièrement intéressants pour diverse utilisations notamment dans le domaine de l'électronique.

Généralement classés en deux catégories, les nano-objets (comme les nanoparticules) et les nanostructures (comme nanotubes, nano films, Graphene etc....).

II.2. Type des nanomatériaux

Ils sont classés en deux grandes catégories, selon leur formes, composition et dimensions pour comprendre la différence entre nanoparticules et nanostructures bien que ces derniers sont tous deux compris dans l'échelle de 1 à 100nm[4].

Les nanoparticules et nanostructure

Comme la figure 2 le montre, une nanoparticule de matériaux est constituée de quelque atomes ou de molécules ayant des formes variées sphérique, cubique etc. [3][4]

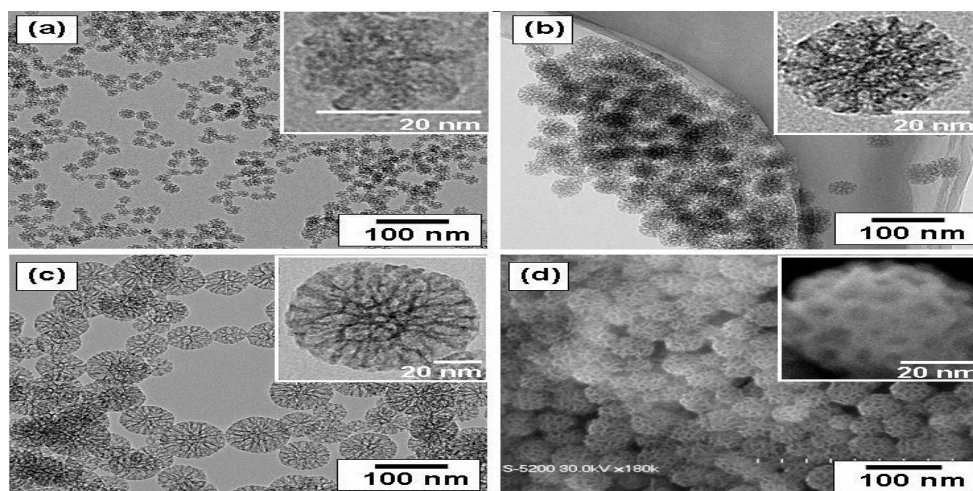



Figure I.2 : Vue en microscopie électronique en transmission (TEM) de nanoparticules de silice mésoporeuse, avec des diamètres de 20 nm (a), 45 nm (b), et 80 nm (c). Les nanostructures.

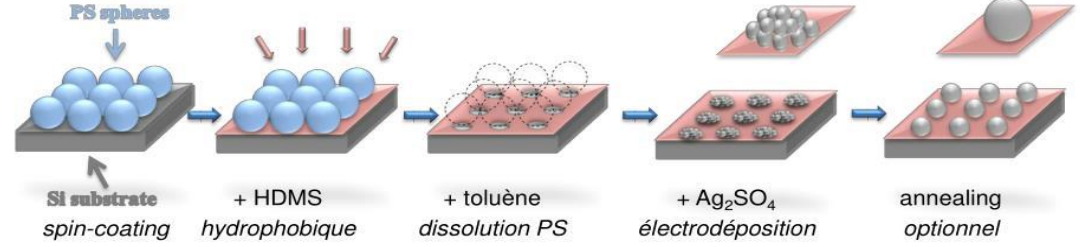
Etant les nanoparticules représentent des structures simples sur l'échelle nanométrique, les nanostructures par contre sont d'une structure plutôt complexe généralement composée de nanoparticules ou de motifs comme le représente la Figure I.3.

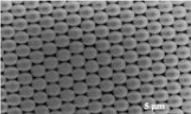


Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

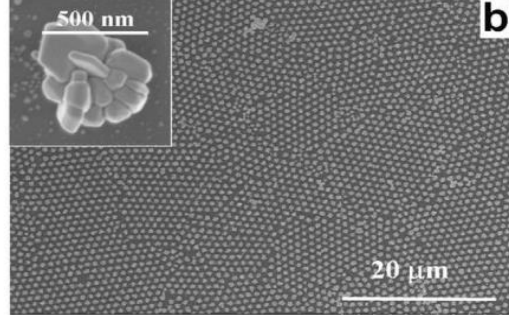
"NANOTECHNOLOGIE À FRIBOURG"
EIA-FR, Fribourg, 04.07.2012

2. Les nanostructures: exemple 1 - nanostructures d'Ag





2D cristal colloidal



b

contrôle de:

- taille (temps)
- écart (diamètre PS)
- cristallinité (annealing)

10

Prof. Pierre BRODARD

www.eia-fr.ch

Figure I.3: illustration de nano structure réaliser par spectroscopie Raman.

Les nanostructures peuvent être 1D (nano fils, nanotubes), 2D (couches minces, graphène) ou 3D (nanoparticules, nanostructures auto-assemblées). Les nano-composites 3D se forment lorsque deux ou plusieurs matériaux dotés de propriétés individuelles agissent en synergie pour créer un composite aux propriétés uniques [3][4].

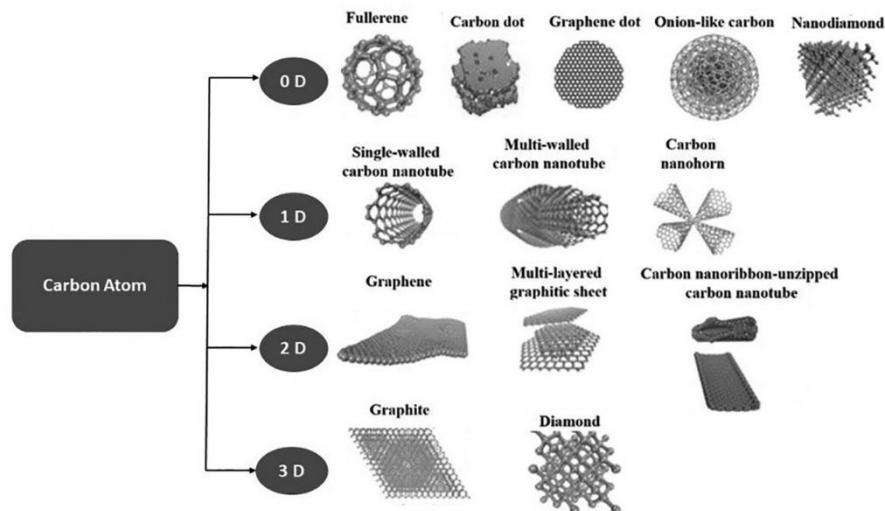


Figure I.4: Classification of carbone nano-allotropes.

III. Types de nanomatériaux utilisés pour interconnexions des circuits intègres

Bien que les nanomatériaux soient plusieurs, les chercheurs sont orientés sur un élément abondant dans la nature qui est le carbone C 14, ces nanomatériaux à base de carbone sont prometteurs dans bien de domaines, à ce fait on présente le carbone et ses allotropes.

III.1 Matériaux a base de carbone

Le carbone est un élément chimique essentiel, dont les caractéristiques et les propriétés en font un composant fondamental de la matière organique et inorganique. Le carbone est un élément chimique de symbole C et de numéro atomique 6. Il est classé parmi les non-métaux et est un métalloïde. Le carbone est présent sous plusieurs formes allotropiques (diamant, charbon, graphite, etc...).

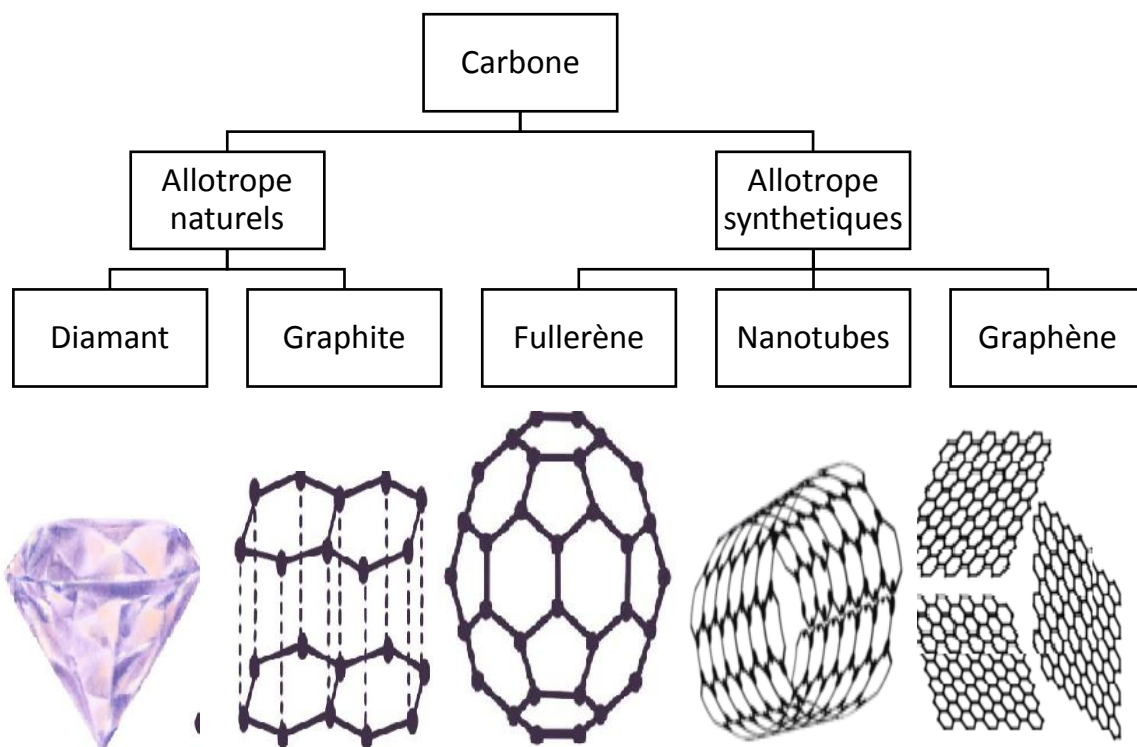


Figure I.5 : Allotropes du carbone.

III.1.1 Nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone (CNT) sont des structures cylindriques de carbone qui présentent des propriétés exceptionnelles, ce qui les rend intéressants pour diverses applications, notamment en nanotechnologie, électronique, et matériaux composites[5].

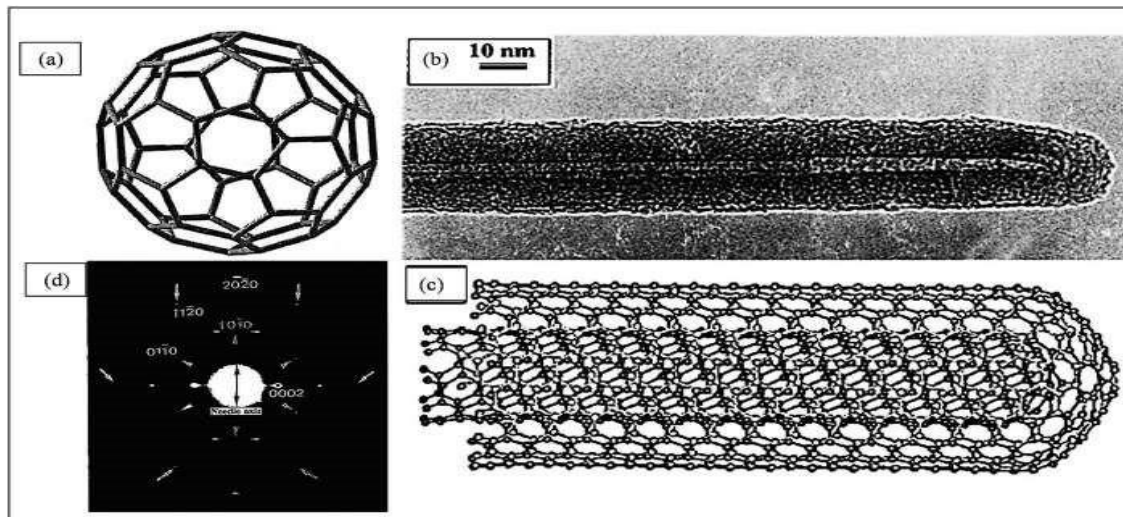


Figure 1.8:(a) Schematic diagram of a C₆₀ molecule; (b) a TEM image of a multi-walled carbon nanotube; (c) Minimum energy structure of a double-walled carbon nanotube; (d) electron diffraction pattern of a multi-walled carbon nanotube. (a–c)

Avantages des nanotubes de carbone

- Conductivité électrique exceptionnelle
- Conductivité thermique élevée
- Résistance mécanique
- Surface réactive
- Applications variées
- Potentiel pour le stockage d'hydrogène
- Flexibilité et légèreté

Types de nano tubes de carbone :

Les NTC peuvent être classés en plusieurs types et cela en fonction de leurs structures et leurs caractéristiques :

Nanotubes de carbone à paroi simple SWCNT :

Constitués d'une seule couche de graphène enroulée en forme de tube de diamètre variable généralement de 0,44 à 6 nanomètres, avec des longueurs pouvant atteindre plusieurs micromètres. Ce type a des propriétés métalliques ou semi-conductrices, selon leur chiralité (l'angle d'enroulement de la feuille de graphène). [5][6]

Nanotubes de carbone à parois multiples MWCNT:

Composés de plusieurs couches de graphène enroulées concentriquement avec un diamètre qui peut atteindre plusieurs dizaines de nanomètres, tandis que la longueur peut également varier,

Les MWCNT présentent généralement une meilleure résistance mécanique que les SWCNT, mais leur conductivité électrique peut être inférieure.[5]

Nanotubes de carbone à double paroi :

Formés de deux couches de graphène enroulées l'une autour de l'autre, ce type a une caractéristique intermédiaire entre les SWCNT et les MWCNT, tant en termes de propriétés mécaniques qu'électriques. [6]

Nanotubes de carbone chiraux :

Ces nanotubes ont une chiralité qui détermine leur structure et leurs propriétés, et selon leur chiralité, ils peuvent être métalliques ou semi-conducteurs. Par exemple, les nanotubes de type "zig-zag" sont souvent métalliques, tandis que ceux de type "chaise" peuvent avoir des propriétés semi-conductrices.

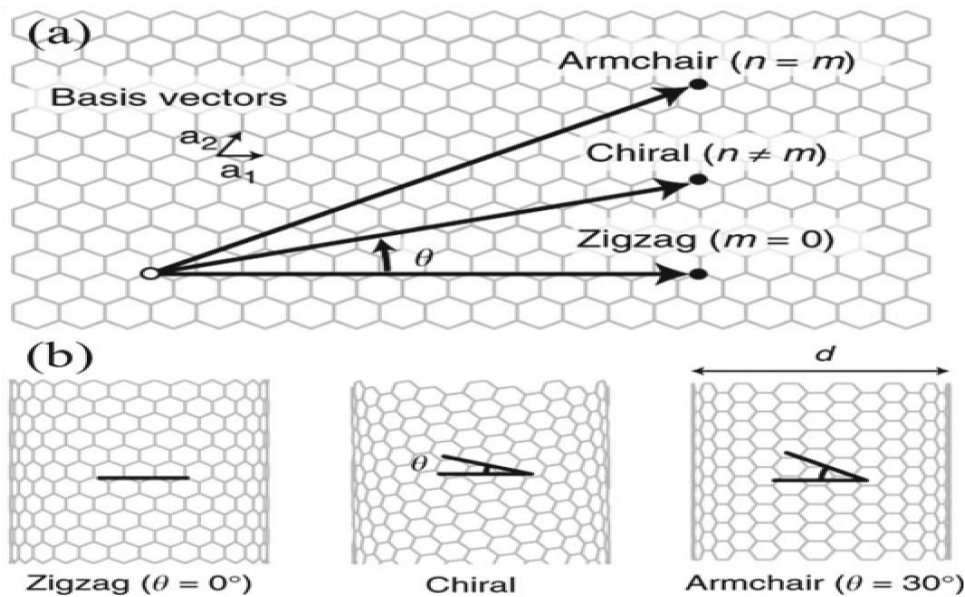


Figure 1.9: Schéma de principe d'une feuille de graphène avec des vecteurs chiraux communs. b SWCNT en zigzag, chiral et fauteuil avec différents angles chiraux.

III.2. Graphène

Le Graphène est un allotrope du carbone qui se distingue par sa structure en nid d'abeille figure 9, ce matériau bidimensionnel constitué d'une seule couche d'atomes de carbone disposés en un réseau hexagonal où chaque atome de carbone est lié à trois autres atomes par des liaisons covalentes sp^2 . Cette configuration confère au graphène des propriétés exceptionnelles, telles qu'une résistance mécanique très élevée, une conductivité électrique et thermique remarquables, ainsi qu'une flexibilité et une légèreté impressionnantes.

Le graphène est souvent considéré comme un matériau prometteur pour diverses applications, notamment dans les domaines de l'électronique, des nanotechnologies, des batteries, et des matériaux composites, en raison de ses caractéristiques uniques qui pourraient révolutionner de nombreux secteurs industriels [7].

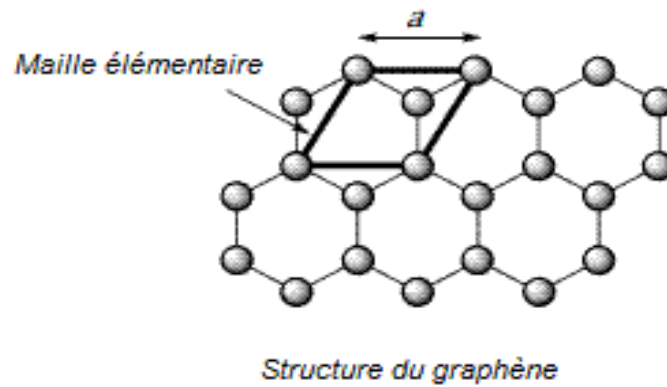


Figure I.10 : structure du Graphène du carbone.

Parmi ses principaux avantages :

- Une résistance mécanique inégalée, plus de 200 fois plus solide que l'acier tout en étant léger
- Une conductivité électrique et thermique exceptionnelle
- Une flexibilité et une transparence remarquables
- Une surface extrêmement large et réactive

Le graphène se décline en plusieurs types, chacun ayant des caractéristiques et des applications spécifiques. Voici les principaux types de graphène :

Graphène Monocouche (Single Layer Graphene - SLG)

Il est constitué par une seule couche d'atomes de carbone disposés en un réseau hexagonal.

Il se distingue par son excellente conductivité électrique et thermique et sa résistance mécanique élevée.

Il trouve son application dans des dispositifs électroniques avancés tel que des capteurs et des matériaux composites.

b. Graphène à quelques couches (Few Layer Graphene - FLG)

Il se compose de 2 à 5 couches de graphène. Il se distingue par ces propriétés intermédiaires entre le graphène monocouche et le graphène multicouche, avec une conductivité et une résistance légèrement inférieure. Il est utilisé dans les applications où une conductivité élevée est requise, mais où le coût de production doit être réduit.

Graphène Multicouche (Multi-Layer Graphene - MLG)

Il se compose de moins de 10 couches de graphène. Il est moins performant que le graphène monocouche en termes de conductivité, mais plus facile à produire. Il est appliqué dans des applications nécessitant des matériaux solides et durables, comme les composites.

4. Nano plaquettes de Graphène (Graphene Nanoplatelets - GNP)

C'est une forme de graphène avec un grand nombre de couches (plus de 10). Elles sont moins conductrices que les formes plus fines, mais encore utiles pour certaines applications. Elles sont utilisées dans des matériaux composites pour améliorer la résistance et la durabilité.

5. Oxyde de Graphène (Graphene Oxide - GO)

Forme de graphène qui contient des groupes fonctionnels oxygénés. Il est hydrophile et peut être dispersé dans l'eau, ce qui facilite son utilisation dans des applications de revêtement et de filtration.

Il est utilisé dans les revêtements, les membranes de filtration et comme précurseur pour réduire en oxyde de graphène.

Ces différents types de graphène offrent une variété de propriétés qui peuvent être exploitées dans de nombreuses applications technologiques, allant de l'électronique à la nanomédecine.

III.3. Nano fils de cuivre

Le cuivre est un élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique 29, l'élément traditionnel utilisé dans diverses branches du génie électrique notamment dans les circuits intégrés il joue un rôle essentiel dans la fabrication microélectronique par ses propriétés qui sont adéquate.

Représente des structures allongées nanométrique, leur diamètre généralement entre 1 et 900 nm utiliser dans les CI pour interconnexions entre composant due a des propriétés de conduction électrique et thermique qui assure une communication rapide et efficace [8].

III.3.1. Types de nano fils de cuivre

Ces nano fils de cuivre se présentent sous plusieurs types, qui sont :

Nano fils de cuivre pur

Constitués uniquement de cuivre et présentent des propriétés électriques et mécaniques optimales. Ils sont souvent utilisés dans des applications nécessitant une conductivité élevée.

Nano fils de cuivre oxydés

Former en exposition du cuivre a l'oxygène formant des nano fils d'oxyde de cuivre (CuO ou Cu₂O), Bien qu'ils aient des propriétés différentes, ils sont également étudiés pour des applications spécifiques.

Nano fils composites de cuivre

Ces nano fils sont fabriqués en combinant du cuivre avec d'autres matériaux, comme des polymères ou d'autres métaux, pour améliorer certaines propriétés, comme la résistance à la corrosion ou la flexibilité.

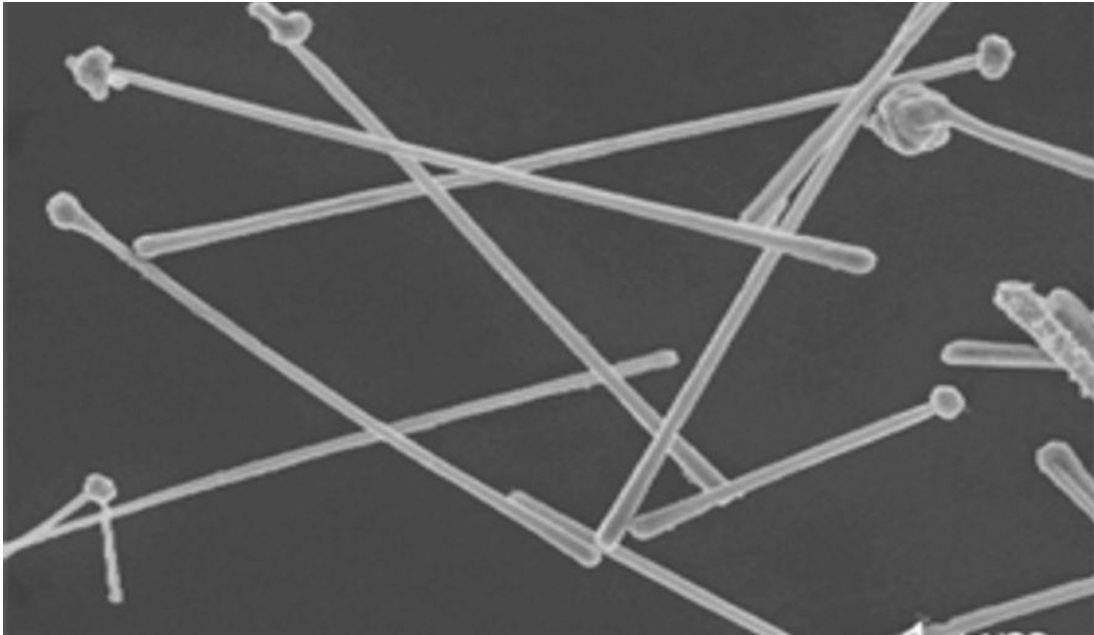


Figure I.11 Nano fils de cuivres, alternative souple et bon marché à l'ITO (Indium Tin Oxide).

III.4.Nano fils de silicium

Les nano fils de silicium de plus en plus étudiés pour leur potentiel dans les interconnexions des circuits intégrés, ces derniers ont bien plusieurs applications en fabrication moderne en transistors et capteur, et surtout en intégration 3D en réalisation des CI plus dense et des dispositifs bien plus performant [9].

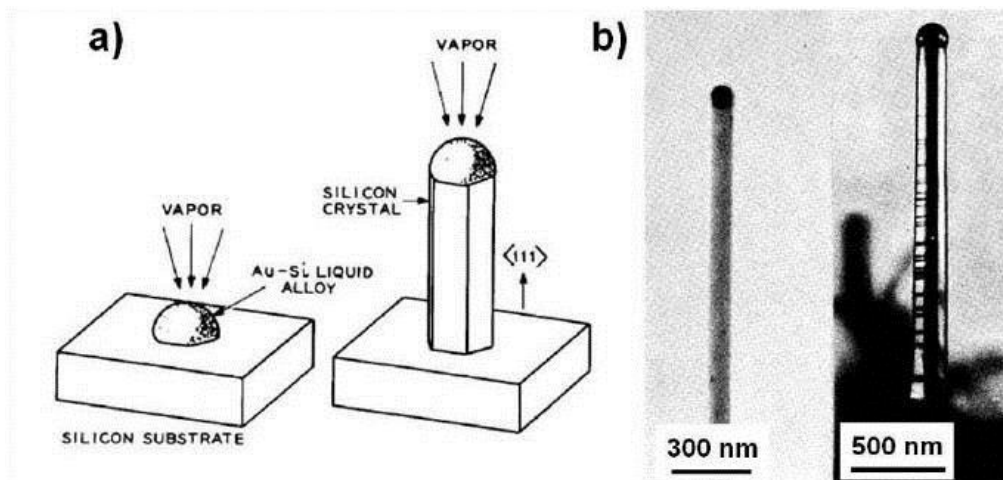


Figure I.12 : (a) Représentation schématique de la croissance VLS des nano fils du Si montrant l'état au début et à la fin de croissance. (b) Image MEB du premier nano fil de Silicium.

III.4.1. Avantage des nano fils de silicium

Parmi ces principaux avantages on nomme :

- Excellente conductivité électrique
- Flexibilité dans les applications
- Compatibilité avec les technologies existantes

III.4.2. Types de nano fils de silicium

Nano fils de Silicium Monocristallin Ces nano fils sont souvent obtenus par la méthode de croissance VLS (Vapeur-Liquide-Solide). Ils présentent une excellente cristallinité, ce qui est crucial pour des performances électriques optimales. Leur structure permet une faible résistance à l'écoulement du courant, ce qui les rend idéaux pour les applications dans les transistors et les circuits intégrés.

Nano fils de Silicium Polycristallin Ces nano fils sont fabriqués par des méthodes comme la gravure chimique ou la déposition par couches atomiques. Bien qu'ils aient une conductivité inférieure à celle des nano fils monocristallins, leur fabrication est souvent plus simple et moins coûteuse. Ils peuvent être utilisés dans des applications où une conductivité légèrement inférieure est acceptable.

Nano fils de Silicium-Germanium : Ces nano fils combinent le silicium et le germanium, offrant des propriétés électriques améliorées, notamment une mobilité des porteurs de charge plus élevée. Ils sont particulièrement prometteurs pour les applications à haute fréquence et dans les circuits intégrés 3D, où ils peuvent être intégrés dans des architectures complexes.

Nano fils Synthétisés par Voie "Top-Down" Cette méthode consiste à graver des nano fils à partir d'un substrat de silicium massif. Bien que cette approche permette un meilleur contrôle des dimensions, elle peut introduire des défauts dans la structure cristalline, affectant ainsi les performances électriques. Ces nano fils sont souvent utilisés dans des applications où la précision dimensionnelle est critique.

Nano fils Synthétisés par Voie "Bottom-Up" : Ces nano fils sont créés par autoassemblage ou croissance catalytique, permettant d'obtenir des structures avec une meilleure uniformité et cristallinité. Ils sont souvent utilisés dans les niveaux d'interconnexion où la performance électrique est primordiale.

IV. Propriétés des Nanomatériaux et leurs applications

IV.1. Nanomatériaux à base de carbone

IV.1.1. Nanotubes de Carbone (NTC)

Les nanotubes de carbone (NTC) présentent des propriétés électriques remarquables qui les rendent très attractifs pour diverses applications technologiques. Leur conductivité électrique dépend principalement de leur chiralité et de leur structure, avec des nanotubes dits « chaise »

agissant comme des conducteurs, tandis que d'autres se comportent comme des semi-conducteurs. La largeur de la bande interdite des NTC semi-conducteurs varie en fonction de leur diamètre et de leur chiralité, influençant ainsi leur capacité à conduire l'électricité à température ambiante. Des études expérimentales ont montré que la conductivité électrique des nanotubes multi-parois (MWNT) peut atteindre des valeurs comprises entre 10^4 et 10^7 S/m, ce qui est comparable à celle des métaux les plus conducteurs. En outre, les nanotubes de carbone peuvent devenir supraconducteurs à basse température, ajoutant une dimension supplémentaire à leurs applications potentielles. Grâce à leur structure quasi-unidimensionnelle, les électrons se déplacent avec une grande efficacité le long des nanotubes, ce qui permet d'envisager leur utilisation dans des dispositifs électroniques avancés tels que les transistors et les capteurs, offrant ainsi des performances supérieures à celles des matériaux traditionnels comme le silicium [1].

En résumer les caractéristiques des NTC sont :

IV.1.1.1. Propriétés des nanotubes de carbone

Propriétés Physiques et Mécaniques

Les NTC présentent des propriétés remarquables :

Résistance : Ils sont extrêmement résistants, avec une résistance à la traction 100 fois supérieure à celle de l'acier.

Légèreté : Leur faible densité les rend idéaux pour des applications où le poids est un facteur critique.

Conductivité : Les nanotubes peuvent conduire l'électricité aussi bien que le cuivre, ce qui les rend utiles dans l'électronique et les dispositifs de stockage d'énergie.[2][4]

Nanotube de carbone Propriétés	Mono-feuillet	Multi-feuillets
Limite d'élasticité	45 GPa	150 GPa
Module d'Young	1 à 1,4 TPa	1,4 à 1,6 TPa
Module de cisaillement	0,27 TPa	0,44 à 0,47 TPa
Module de flexion	0,2 à 1,2 TPa	3 à 30 GPa

Tableau I. 1 : Quelques propriétés mécaniques des nanotubes de carbone [4]

Propriétés Électriques et Thermiques

Conductivité électrique : Les NTC peuvent supporter des densités de courant très élevées, jusqu'à 10^{13} A/m², sans perte significative d'énergie.[5]

Conductivité thermique : Ils possèdent une conductivité thermique exceptionnelle, ce qui les rend prometteurs pour des applications en thermique dans des dispositifs

Matériaux	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Diamant	1000 - 2600
Graphène	3080 - 5150
NTC	3000 - 6600

électroniques.[4][5]

Matériaux	Résistivité	Conductivité électrique
Aluminium	27	37
Argent	16	61
Cuivre	17	58
Graphite	38	26
NTC	≤1000	≤100
Or	23	44
Palladium	108	9
Platine	108	9

Tableau I.2 : Résistivités et conductivités électriques de quelques matériaux à 300 K [5]

Comme le montre le tableau II.3 Les nanotubes de carbone ont une conductivité thermique supérieure à celle de l'argent, du cuivre et du diamant (entre 1 000 et 2 600 W/mK) et constituent les meilleurs conducteurs thermiques connus.

Aluminium		237
Alumine	23	
Argent		429
Cuivre		401
Or		317
Palladium		72

Tableau I.3 : Conductivités thermiques à 300 K des allotropes du carbone en comparaison à celles de quelques matériaux [5]

Applications

Les applications des nanotubes de carbone sont vastes et en constante expansion :

Matériaux composites : Utilisés comme renforts dans les matériaux composites pour améliorer la résistance et la durabilité. [2]

Électronique : Intégration dans les circuits intégrés pour améliorer la performance électrique. [5]

Énergie : Utilisés dans les batteries et super condensateurs pour augmenter la capacité de stockage d'énergie. [3]

Médecine : Potentiels vecteurs pour la délivrance ciblée de médicaments grâce à leur taille nanométrique et leur capacité à interagir avec les cellules biologiques. [4]

IV.1.2.Graphène

IV.1.2.1.Propriété des nanoruban de graphène

Conductivité Électrique

Le graphène est un conducteur électrique exceptionnel, avec une conductivité comparable à celle du cuivre. Sa structure en nid d'abeille unique permet une mobilité des électrons très élevée, atteignant théoriquement $200\,000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ [6]. Cette propriété en fait un matériau prometteur pour remplacer le cuivre dans les interconnexions de circuits intégrés.

Résistance Mécanique

Le graphène est l'un des matériaux les plus résistants connus, avec une résistance à la traction de l'ordre de 130 GPa. Cette résistance mécanique élevée [7], combinée à sa flexibilité, en fait un candidat idéal pour des interconnexions fiables dans des circuits intégrés soumis à des contraintes mécaniques.

Stabilité Thermique

Le graphène présente une excellente stabilité thermique, avec une température de fusion estimée à 4 510 °C [8]. Cette propriété est cruciale pour les interconnexions qui doivent supporter les hautes températures lors des procédés de fabrication des circuits intégrés.

Faible Capacitance Parasite

Grâce à son épaisseur monoatomique, le graphène présente une faible capacitance parasite entre les interconnexions [9]. Cela permet de réduire les délais de propagation du signal et d'améliorer les performances des circuits intégrés.

IV.1.2.2.Applications

Applications Électroniques

Transistors : Le graphène est considéré comme un candidat pour remplacer le silicium dans les transistors, permettant la fabrication de dispositifs plus rapides et plus efficaces [7][9].

Capteurs : Grâce à sa haute sensibilité, le graphène est utilisé dans des capteurs pour détecter des molécules spécifiques, y compris des virus comme le COVID-19 et la malaria [6][7].

Écrans Flexibles : Utilisé dans la fabrication d'écrans tactiles et de dispositifs optoélectroniques flexibles en raison de sa transparence et de sa conductivité [6][7].

Applications dans l'Énergie

Cellules Solaires : Le graphène est intégré dans des cellules photovoltaïques pour améliorer leur efficacité grâce à ses propriétés conductrices [7][9].

Stockage d'Énergie : Utilisé dans les batteries et supercondensateurs, le graphène améliore les performances par rapport aux matériaux traditionnels.[6][10]

Applications Médicales

Délivrance de Médicaments : Le graphène peut être utilisé comme vecteur pour la délivrance ciblée de médicaments, permettant une libération contrôlée.[6][7]

Dispositifs Médicaux : Des capteurs basés sur le graphène sont développés pour des applications médicales, notamment pour la détection de maladies. [6][9]

Applications dans les Matériaux Composites

Revêtements Anticorrosion : Le graphène est utilisé pour créer des revêtements protecteurs sur les métaux, augmentant leur résistance à la corrosion et à l'oxydation.[6][10]

Renforcement de Matériaux : En intégrant le graphène dans des composites, on obtient des matériaux plus légers et plus résistants, utilisés dans l'automobile et l'aérospatial.[10]

IV.1.2.3.Autres Applications Innovantes

Filtration de l'Eau : Le graphène a le potentiel d'être utilisé dans des systèmes de filtration pour purifier et dessaler l'eau.[7][9]

Éclairage Énergétiquement Efficace : Utilisé dans des sources lumineuses telles que les LED et les dispositifs photoniques.[7][10]

Ces applications montrent comment le graphène peut transformer divers secteurs grâce à ses propriétés uniques.

IV.1.3.Nano fils de cuivres

IV.1.3.1.Propriétés des nano fils de cuivre

Les nano fils de cuivre sont des structures nanométriques qui présentent des caractéristiques uniques, les rendant intéressants pour diverses applications technologiques, notamment dans le domaine de l'électronique et de l'énergie.

Conductivité électrique

Les nano fils de cuivre présentent une conductivité électrique améliorée par rapport aux matériaux massifs en raison de la réduction des effets de diffusion à l'échelle nanométrique. Cependant, leur conductivité peut être affectée par des facteurs tels que l'oxydation et l'agglutination [10][12].

Flexibilité

Un des avantages majeurs des nano fils de cuivre est leur flexibilité, ce qui les rend adaptés pour être utilisés dans des électrodes imprimées sur des substrats souples, permettant ainsi la fabrication d'appareils électroniques flexibles [12].

IV.1.3.2.Applications

Électronique : Les nano fils de cuivre sont envisagés comme alternatives aux électrodes transparentes traditionnelles, telles que l'oxyde d'indium-étain (ITO), en raison de leur coût inférieur et de leurs meilleures propriétés électroniques. Ils peuvent être utilisés dans les cellules solaires, les écrans plats et d'autres dispositifs optoélectroniques.

Batteries au lithium : Des recherches ont montré que les réseaux de nano fils de cuivre peuvent améliorer la performance des batteries au lithium en réduisant la formation de dendrites, ce qui est crucial pour la sécurité et l'efficacité des batteries [10][12].

IV.1.4.Nano fils de silicium

IV.1.4.1.Propriétés des nano fils de Silicium

Les nano fils de silicium (NFSi) présentent des caractéristiques uniques qui les rendent particulièrement adaptés pour des applications dans le domaine de la microélectronique, notamment pour les mémoires et les interconnexions dans les circuits intégrés.

Dimensions : Les nano fils de silicium ont un diamètre typiquement compris entre 1 et 100 nanomètres, ce qui leur confère un rapport surface/volume élevé, essentiel pour de nombreuses applications [13].

Structure cristalline : Les NFSi peuvent être synthétisés par différentes méthodes, y compris l'approche top-down (gravure) et l'approche bottom-up (croissance), permettant ainsi un contrôle précis de leur structure et de leurs propriétés électroniques [16].

Propriétés électriques : Les nano fils de silicium montrent une conductivité électrique améliorée par rapport au silicium massif, ce qui est crucial pour des applications dans des dispositifs électroniques avancés. La modulation de la bande de conduction à travers des techniques de gravure locale permet d'optimiser ces propriétés [13][14].

IV.1.4.2.Applications

Mémoires et dispositifs logiques : Les NFSi sont utilisés pour créer des jonctions p-n, essentielles pour la fabrication de portes logiques et d'autres composants électroniques. Cela ouvre la voie à des mémoires plus compactes et efficaces.

Capteurs : Grâce à leur grande surface, les nano fils sont efficaces pour la détection biologique et chimique, permettant une sensibilité accrue dans les applications de bio-détection [14].

Supercondensateurs : Les NFSi sont étudiés comme électrodes dans les supercondensateurs en raison de leur capacité à stocker une grande quantité d'énergie tout en maintenant une bonne conductivité [14].

Énergie solaire : Ils sont également envisagés pour améliorer l'efficacité des cellules solaires grâce à leur capacité à piéger la lumière et à collecter les porteurs de charge plus efficacement [14].

IV.1.4.3.Autres applications

Le passage à l'échelle nanométrique confère aux matériaux des propriétés physico-chimiques inédites et modulables, permettant d'optimiser leurs performances ou de leur conférer de nouvelles fonctionnalités. Grâce à ces avancées, les nanomatériaux sont promis à de nombreuses applications innovantes dans des domaines clés comme l'énergie, la santé ou l'électronique. Néanmoins, leur synthèse et leur intégration à grande échelle représentent encore des défis technologiques et économiques à relever [19].

SECTEURS D'ACTIVITE	EXEMPLES D'APPLICATIONS ACTUELLES ET POTENTIELLES
Automobile, aéronautique et aérospatial	Matériaux renforcés et plus légers ; peintures extérieures avec effets de couleur, plus brillantes, anti rayures, anticorrosion et antisalissure ; capteurs optimisant les performances des moteurs ; détecteurs de glace sur les ailes d'avion ; additifs pour diesel permettant une meilleure combustion ; pneumatiques plus durables et recyclables...
Électronique et communications	Mémoires à haute densité et processeurs miniaturisés ; cellules solaires ; bibliothèques électroniques de poche ; ordinateurs et jeux électroniques ultrarapides ; technologies sans fil ; écrans plats...
Agroalimentaire	Emballages actifs ; additifs : colorants, antiagglomérants, émulsifiants...
Chimie et matériaux	Pigments ; charges ; poudres céramiques ; inhibiteurs de corrosion ; catalyseurs multifonctionnels ; textiles et revêtements antibactériens et ultrarésistants...
Construction	Ciments autonettoyants et antipollution, vitrages autonettoyants et antisalissures ; peintures ; vernis ; colles ; mastics...
Pharmacie et santé	Médicaments et agents actifs ; surfaces adhésives médicales anti allergènes ; médicaments sur mesure délivrés uniquement à des organes précis ; surfaces biocompatibles pour implants ; vaccins oraux ; imagerie médicale...
Cosmétique	Crèmes solaires transparentes ; pâtes à dentifrice abrasives ; maquillage avec une meilleure tenue...
Énergie	Cellules photovoltaïques nouvelle génération ; nouveaux types de batteries ; fenêtres intelligentes ; matériaux isolants plus efficaces ; entreposage d'hydrogène combustible...
Environnement et écologie	Diminution des émissions de dioxyde de carbone ; production d'eau ultra pure à partir d'eau de mer ; pesticides et fertilisants plus efficaces et moins dommageables ; analyseurs chimiques spécifiques...
Défense	Détecteurs d'agents chimiques et biologiques ; systèmes de surveillance miniaturisés ; systèmes de guidage plus précis ; textiles légers et qui se réparent d'eux-mêmes...

Tableau I.4 : Applications des nanotechnologies et des nanomatériaux en fonction des secteurs d'activité

V. Conclusion

Ce chapitre a dévoilé les bases nécessaires pour une compréhension superficielles des nanomatériaux et leurs types ainsi leurs avantages d'une manière générale,et projeter des détaille sure leurs propriétés et leur applications concrètes et domaines d'applications.

Chapitre II Méthodes de synthèse et applications

I. Introduction :

Dans le précédent chapitre, on a étudié les différents nanomatériaux ainsi que leur physique et leur propriétés, ces nanomatériaux sont synthétisés et caractérisés grâce à des méthodes diverses et variées très pointues, cela nécessite des approches multidisciplinaires.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les différentes méthodes de synthèse des nanomatériaux ainsi que les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles ainsi que leurs techniques de caractérisations.

II. Les méthodes de synthèse

II.1 Nanomatériaux à base de carbone

II.1.1. Les nanotubes de carbone

Il existe deux grandes familles de méthodes pour l'élaboration

de nano-tubes de carbone [17] :

La première voie, nommée voie de synthèse à haute température, consiste à sublimer le carbone graphite et à le condenser dans une enceinte mise sous atmosphère inerte (sous hélium ou argon) et dans laquelle règne une température élevée (le graphite se sublime à une température de 3200°C). Les différentes méthodes utilisant ce principe se distinguent par le procédé de sublimation du graphite mis en œuvre :

Arc électrique

Dans le procédé de Krätschmer et Huffman, historiquement utilisé par S. Iijima, un arc électrique est établi entre deux électrodes de graphite. L'anode se consume pour former un plasma dont la température peut atteindre 6 000°C. Ce plasma se condense sur l'autre électrode, la cathode, en un dépôt caoutchouteux et filamenteux, évoquant une toile d'araignée très dense et contenant les nanotubes. Ce procédé est simple et peu coûteux mais les processus qui se déroulent lors de la synthèse sont complexes, ce qui rend délicat leur

contrôle et leur étude[18].

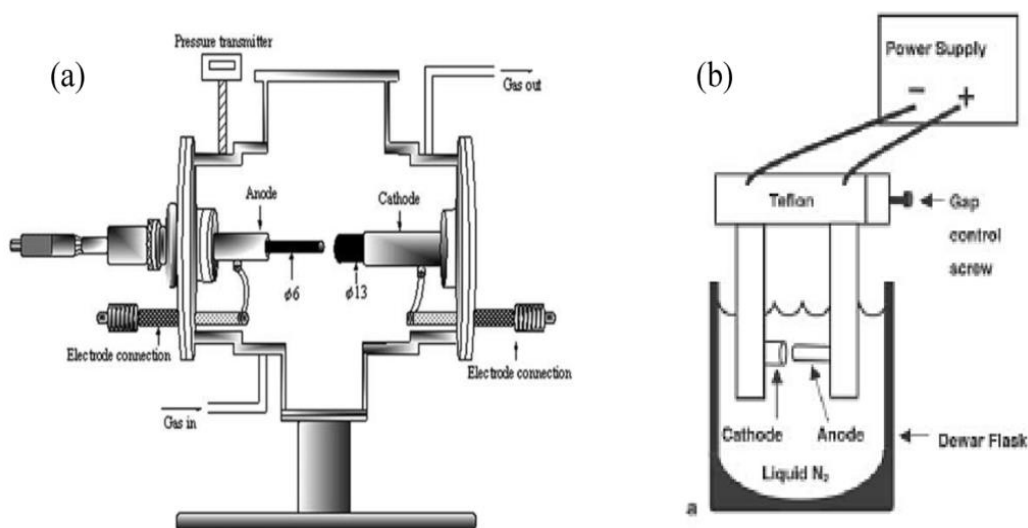


Figure II.1 a) Représentation schématique d'un appareil à décharge d'arc. b) Mise en place expérimentale de la décharge d'arc dans l'azote liquide.

Ablation Laser

Cette technique, développée initialement par le groupe de R. Smalley à l'Université de Houston(USA), consiste à bombarder une cible de graphite avec un rayonnement laser de forte énergie. Les conditions de synthèse et la nature des nanotubes varient selon que le laser est continu ou pulsé. Le graphite est ainsi soit sublimé soit expulsé en petits agrégats de quelques atomes. Contrairement au précédent, ce procédé est coûteux mais présente un rendement de synthèse plus important et un nombre restreint de paramètres de contrôle ce qui rend possible l'étude des conditions de synthèse et leur modélisation[17][18].

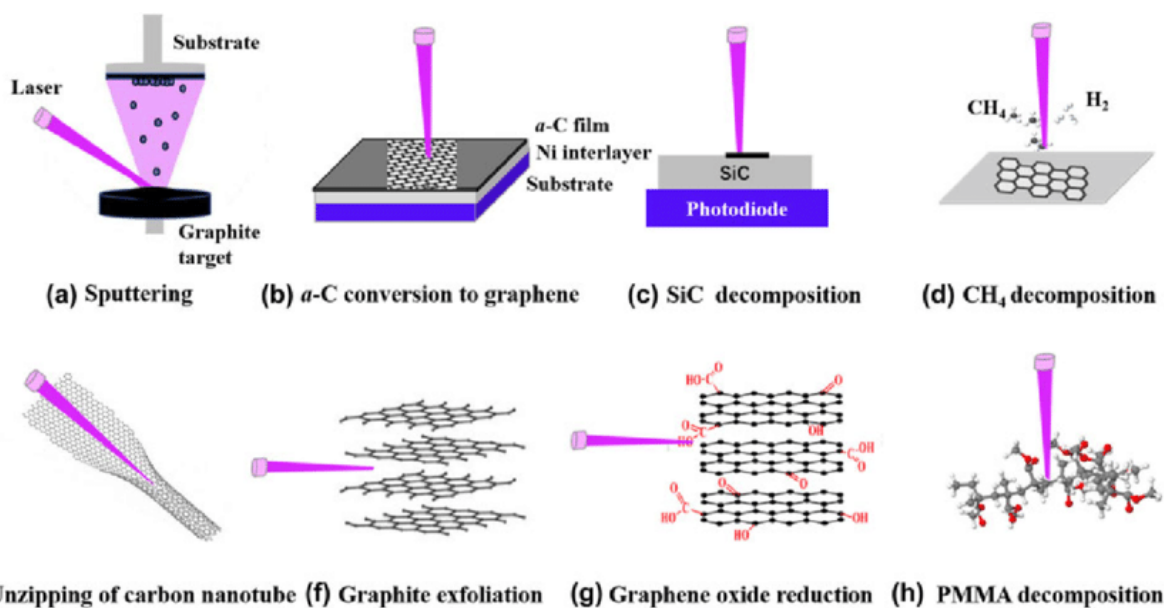


Figure II.2 : Synthèse du graphène par diverses méthodes laser. Formation de graphène par (a) pulvérisation laser pulsée d'une cible en graphite, (b) conversion induite par laser de a-C en graphène, (c) décomposition

SiC assistée par laser, (d) décomposition CH₄ assistée par laser, (e) décompression CNT avec un laser, (f) exfoliation laser, (g) réduction de l'oxyde de graphène avec un laser, et (h) décomposition assistée par laser du PMMA.

II.1.2 Graphène

Exfoliation

En 2004, Geim, Novoselov et leurs collaborateurs ont réussi à isoler quelques plans de graphène, ce qui semblait impossible auparavant. Leur méthode consistait à exfolier mécaniquement un cristal de graphite avec du ruban adhésif, puis à reporter les couches sur un substrat de silicium. Bien que l'exfoliation soit simple, identifier les zones de faible épaisseur et contrôlée n'est pas évident. Le groupe de Manchester a réussi à observer des fragments de quelques monocouches en utilisant une méthode optique. Ils ont mesuré la résistance longitudinale et la résistance de Hall, mettant en évidence l'effet Hall quantique inattendu. L'expérience a aussi montré un effet bipolaire, avec un maximum de résistance surfacique diminuant de chaque côté en fonction de la tension de grille, ce qui est nouveau pour un matériau semi-métallique. Le graphène exfolié peut être suspendu pour réduire la diffusion des porteurs par les défauts du substrat, permettant d'atteindre de très hautes mobilités après recuit (200 000 cm².V⁻¹.s⁻¹). Bien qu'accessible et facile à mettre en œuvre, l'exfoliation ne permet pas d'obtenir de grandes surfaces de graphène. D'après Graphene Industries, leurs plus grands morceaux de graphène exfolié (0,08 mm² pour un monoplan et 0,045 mm² pour un biplan) sur un substrat de Si avec 90 nm de SiO₂ coûtent 1900 £.[24]

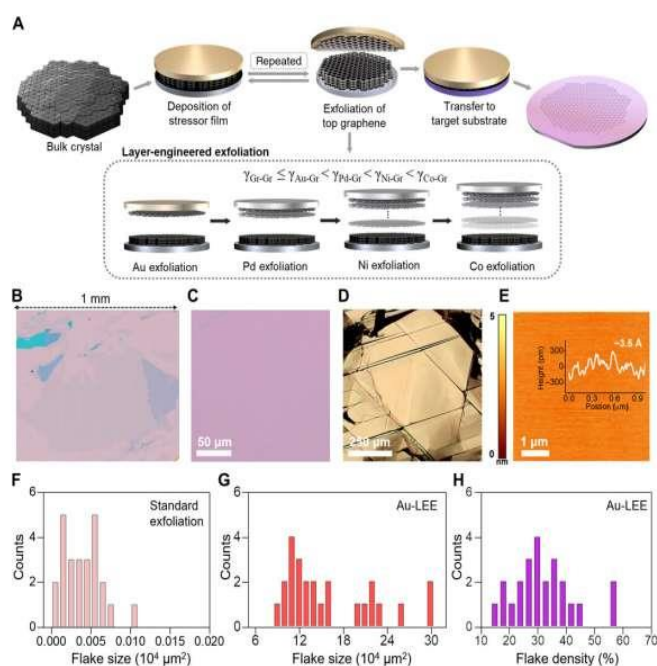


Figure II.3 : Exfoliation du graphène: (A) photographie en lumière blanche d'un film de plusieurs plans de graphène (épaisseur ~ 3 nm) déposé sur un substrat de Si oxydé. Images AFM (B) d'une aire de 2 µm x 2 µm proche du bord de ce film et (C) d'un seul plan de graphène.

CVD sur métaux

La croissance de graphène par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) d'hydrocarbures sur des substrats métalliques a été développée à partir de 2007. Une grande variété de métaux ont été utilisés avec succès, comme le nickel, le ruthénium, le platine, l'iridium, le rhodium et le cuivre.

Deux mécanismes de croissance sont possibles selon la solubilité du carbone dans le métal [25]:

Quand la solubilité est très faible, la croissance se fait par CVD catalysée à la surface du métal.

Quand la solubilité n'est pas négligeable, le carbone dissout dans le substrat ségrège à la surface lors du refroidissement (mécanisme de dissolution/ségrégation).

L'épaisseur du graphène varie d'une monocouche sur cuivre à plusieurs plans sur nickel selon le métal utilisé. Cependant, pour les applications technologiques, le graphène doit être transféré sur un substrat isolant car les métaux sont conducteurs [Figure 1.8].

Une autre approche consiste à utiliser un film mince de métal déposé sur un isolant comme le quartz. Après croissance du graphène, le métal est gravé, permettant d'accéder directement aux propriétés électroniques du graphène sur l'isolant.

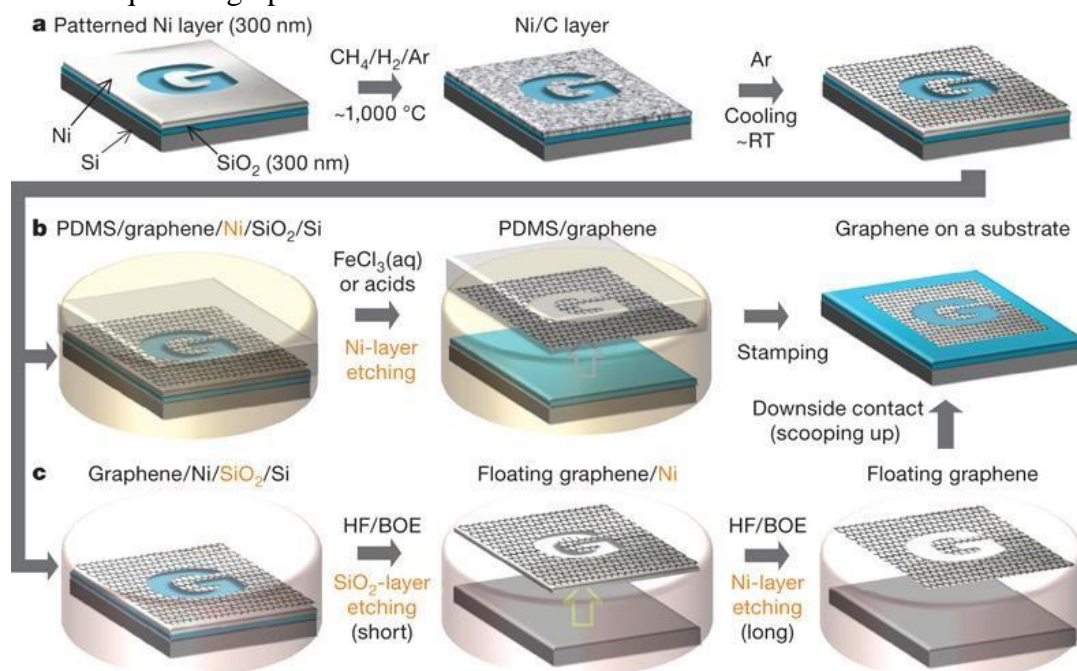


Figure II:4 : Processus de synthèse et transfert pour des films à grande échelle obtenus en croissance par CVD

Graphitisation sur SiC

La graphitisation du carbure de silicium (SiC) est une méthode intéressante pour produire du graphène, en particulier grâce à l'utilisation de techniques d'épitaxie. Ce procédé consiste à chauffer

le SiC à très haute température (plus de 1250°C) sous vide. Cela entraîne la sublimation (passage direct de l'état solide à l'état gazeux) des atomes de silicium présents à la surface du SiC. Il en résulte la formation d'une couche de graphène à la surface du substrat [26].

II.2.Nano fils de cuivres

Méthode de Dépôt Chimique en Phase Vapeur (CVD)

La méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est une technique largement utilisée pour la synthèse de nano fils de cuivre. Dans ce processus, des précurseurs gazeux contenant du cuivre sont introduits dans une chambre de réaction sous vide. À des températures élevées, généralement comprises entre 300 °C et 600 °C, ces précurseurs se décomposent et se déposent sur un substrat, formant des nano fils de cuivre. La CVD permet un contrôle précis des conditions de croissance, ce qui influence directement la morphologie et les propriétés des nano fils obtenus. En ajustant des paramètres tels que la température, la pression et le débit des gaz réactifs, il est possible de moduler la taille, l'orientation et la densité des nano fils. Cette méthode présente l'avantage d'être relativement simple et peu coûteuse, tout en permettant d'obtenir des structures de haute qualité. Cependant, un défi majeur réside dans la nécessité de maintenir des températures élevées pour assurer une décomposition efficace des précurseurs, ce qui peut poser problème pour certains substrats sensibles à la chaleur. Grâce à ses capacités de dépôt uniforme et contrôlé, la CVD est devenue une méthode privilégiée dans le domaine de la nanotechnologie pour la fabrication de nano fils de cuivre et d'autres matériaux [27].

Méthode Sol-Gel

La méthode sol-gel est une technique efficace pour la synthèse de nano fils de cuivre, offrant plusieurs avantages en termes de contrôle des propriétés et de simplicité. Ce procédé repose sur des réactions chimiques qui transforment des précurseurs en solution en un réseau solide. Voici un aperçu des étapes clés de cette méthode [27] :

Étapes de la Méthode Sol-Gel pour Nano fils de Cuivre

Préparation de la Solution :

Des précurseurs chimiques, souvent sous forme d'alcools ou d'acides métalliques, contenant du cuivre sont dissous dans un solvant approprié. Cette solution, appelée "sol", contient des particules colloïdales qui sont stabilisées par des interactions chimiques.

Hydrolyse et Condensation :

Lors de l'ajout d'eau et d'autres agents, des réactions d'hydrolyse et de condensation se produisent, formant un gel à partir du sol. Ce gel est constitué d'un réseau tridimensionnel d'oxydes métalliques.

Gélification :

Le sol se transforme progressivement en gel, capturant le solvant et formant une structure solide. Le temps nécessaire pour cette transformation dépend des conditions expérimentales.

Séchage et Traitement Thermique :

Le gel est ensuite séché pour éliminer le solvant, suivi d'un traitement thermique (recuit) à des températures élevées pour favoriser la cristallisation et améliorer les propriétés structurales des nano fils de cuivre.

Formation des Nano fils :

À travers ce processus, les nano fils de cuivre se forment en raison de la condensation et du réarrangement des particules pendant le traitement thermique. La taille et la morphologie des nano fils peuvent être ajustées en modifiant les conditions de synthèse, telles que la température et le temps de traitement.

Évaporation Physique

La méthode d'évaporation physique est une technique efficace pour la synthèse de nano fils de cuivre. Ce procédé consiste à vaporiser du cuivre dans une chambre sous vide, où les atomes de cuivre se condensent sur un substrat pour former des nano fils [27]. Voici un aperçu des étapes et des caractéristiques de cette méthode :

Étapes de la Méthode d'Évaporation Physique pour Nano fils de Cuivre

Préparation du Substrat :

Le substrat, souvent en silicium ou en verre, est nettoyé et préparé pour assurer une bonne adhésion des nano fils.

Évaporation du Cuivre :

Le cuivre est chauffé à des températures élevées dans une chambre sous vide, généralement par évaporation thermique ou par faisceau d'électrons. À ces températures, le cuivre passe de l'état solide à l'état gazeux.

Condensation :

Les atomes de cuivre vaporisés se déplacent vers le substrat et se condensent pour former des nano fils. La taille et la morphologie des nano fils peuvent être contrôlées en ajustant les paramètres tels que la température d'évaporation, la pression dans la chambre et la distance entre la source d'évaporation et le substrat.

Caractérisation :

Après la synthèse, les nano fils de cuivre sont caractérisés par des techniques telles que la microscopie électronique à balayage (MEB) ou la diffraction des rayons X (DRX) pour évaluer leur structure, leur taille et leur qualité

Méthode Vapor-Liquid-Solid (VLS)

La méthode Vapor-Liquid-Solid (VLS) est une technique largement utilisée pour la synthèse de nanofils de cuivre, offrant un contrôle précis sur la croissance et les propriétés des nanostructures. Voici un aperçu détaillé de cette méthode [27] :

Principe de la Méthode VLS

La méthode VLS repose sur l'utilisation d'un catalyseur liquide, généralement un métal, qui joue un rôle crucial dans la formation des nano fils. Le processus se déroule en plusieurs étapes [27] :

Formation du Catalyseur :

Un catalyseur, souvent à base de métaux comme l'or ou l'argent, est déposé sur le substrat. Ce catalyseur est essentiel pour initier la croissance des nano fils.

Absorption des Atomes :

Des atomes de cuivre sont introduits sous forme de vapeur dans la chambre de réaction. Ces atomes sont absorbés par le catalyseur liquide, où ils se dissolvent.

Nucléation et Croissance :

Lorsque la concentration d'atomes de cuivre dans le catalyseur atteint un certain seuil, une nucléation se produit à l'interface entre le catalyseur liquide et le substrat. Les atomes commencent alors à se solidifier, formant des nano fils.

La croissance des nano fils se poursuit grâce à l'apport constant d'atomes de cuivre depuis la phase vapeur vers le catalyseur.

Contrôle des Paramètres :

Les conditions de température, de pression et de composition gazeuse peuvent être ajustées pour contrôler la taille, l'orientation et la morphologie des nano fils produits.

Oxydation Thermique :

L'oxydation thermique est une méthode simple et efficace pour obtenir des nanofils de différents matériaux, notamment le silicium et le cuivre. Le principe consiste à chauffer le substrat contenant le métal à des températures élevées, généralement entre 300°C et 900°C, dans une atmosphère riche en oxygène. Cela entraîne la formation spontanée de nano fils à la surface du substrat.

Paramètres Clés

Les principaux paramètres qui influencent la croissance des nano fils lors de l'oxydation thermique sont :

La température : elle détermine la vitesse d'oxydation et la morphologie des nano fils. Des températures plus élevées favorisent une croissance plus rapide mais peuvent aussi entraîner une diminution de la densité des nano fils.

Le temps de traitement : plus le temps d'oxydation est long, plus les nano fils sont longs. Cependant, au-delà d'un certain temps, leur densité peut diminuer.

La pression partielle d'oxygène : une pression élevée accélère l'oxydation mais peut aussi limiter la croissance des nano fils.

La géométrie du substrat : la forme et la rugosité du substrat influencent la nucléation et la croissance des nano fils.

Mécanisme de Croissance

Le mécanisme de croissance des nano fils par oxydation thermique implique généralement la formation d'un oxyde à la surface du métal. Cet oxyde se fissure et forme des germes à partir desquels les nano fils croissent. La diffusion des espèces réactives (métal ou oxygène) à travers l'oxyde contrôle la vitesse de croissance des nano fils.

II.3. Nanofils de silicium

II.3.1. Méthode Vapor-Liquid-Solid (VLS)

La méthode VLS est l'une des techniques les plus courantes pour la fabrication de nano fils de silicium. Dans ce procédé, un catalyseur métallique (souvent de l'or) est déposé sur un substrat de silicium. Le silicium est ensuite vaporisé sous forme de précurseurs gazeux, tels que le silane (SiH_4). Les atomes de silicium se dissolvent dans le catalyseur liquide et, lorsque la saturation est atteinte, ils se solidifient pour former des nano fils. Cette méthode permet un contrôle précis sur la taille et l'orientation des nano fils[28].

II.3.2. Ablation Laser

L'ablation laser consiste à utiliser un faisceau laser pour vaporiser une cible de silicium, générant ainsi des nano fils. Cette technique permet de contrôler la taille et la morphologie des nanostructures en ajustant les paramètres du laser, tels que l'énergie et la durée d'impulsion. L'ablation laser est particulièrement utile pour produire des nano fils avec des propriétés spécifiques pour des applications en optoélectronique[28].

II.3.3. Évaporation Physique

L'évaporation physique est une méthode où le silicium est chauffé à haute température dans une chambre sous vide, provoquant son évaporation. Les atomes de silicium se condensent ensuite sur un substrat pour former des nano fils. Cette technique est simple à mettre en œuvre et permet d'obtenir des nano fils de haute pureté, bien que le contrôle sur la morphologie puisse être limité[27-28].

II.3.4. Méthode Sol-Gel

La méthode sol-gel implique la préparation d'une solution contenant des précurseurs de silicium qui sont ensuite gélifiés pour former un réseau solide. Après séchage et traitement thermique, les nanofils de silicium sont obtenus. Cette technique permet une grande flexibilité dans le contrôle des propriétés chimiques et physiques des nano fils[27-28].

II.3.4.Oxydation Thermique

L'oxydation thermique peut également être utilisée pour synthétiser des nanofils de silicium en chauffant le silicium dans une atmosphère riche en oxygène. Ce processus entraîne la formation d'une couche d'oxyde qui peut se fissurer et former des nano fils. Bien que cette méthode soit moins courante, elle offre une approche alternative pour produire des structures nanométriques[28].

III. Techniques de caractérisations

La caractérisation des nanomatériaux pour les circuits intégrés peut être classée en deux grandes familles : techniques d'imagerie et techniques de caractérisation en conductivité. Voici un aperçu de chacune de ces familles :

III.1.Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

Utilisée pour obtenir des images en haute résolution des surfaces des nanomatériaux, permettant d'évaluer leur morphologie et structure. La microscopie électronique à balayage (MEB) est connue sous le nom de Scanning Electron Microscopy (SEM) en anglais, une technique avancée d'imagerie se repose sur l'interaction entre un faisceau d'électrons et la matière de l'échantillon, générant divers signaux qui sont ensuite analysés pour reconstruire une image tridimensionnelle [28].

III.1.1.Équipement

Un microscope électronique à balayage se compose principalement des éléments suivants :

Canon à électrons : produit le faisceau d'électrons.

Colonne électronique : focalise le faisceau sur l'échantillon.

Détecteurs : captent les signaux émis par l'échantillon (électrons secondaires, rétrodiffusés, photons X).

Système de pompes à vide : maintient un environnement adéquat pour les mesures.

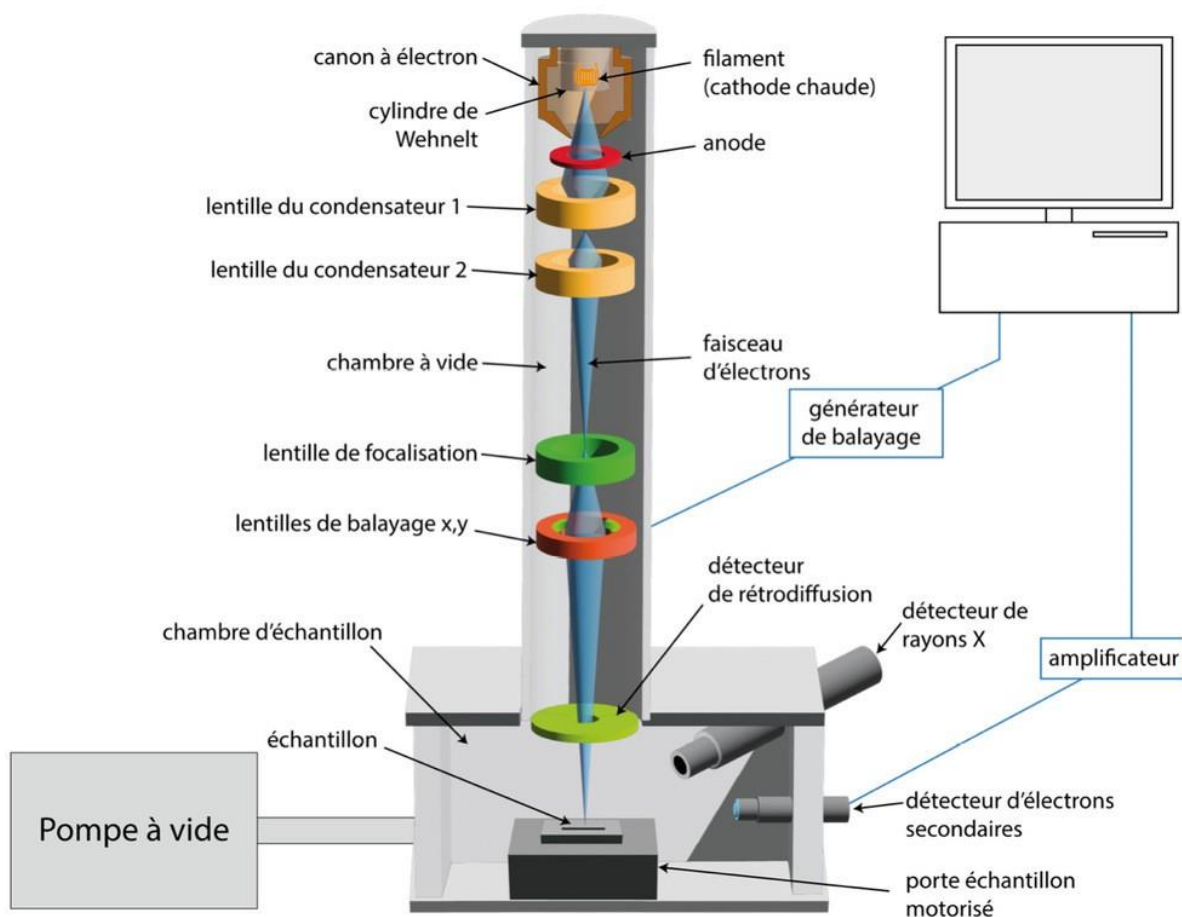


Figure V:5 : Schéma du microscope électronique à balayage.

III.1.2.Principe de Fonctionnement

Son principe se présente comme suit :

Un faisceau d'électrons est envoyé sur l'échantillon à analyser, puis le faisceau est focalisé sur la surface grâce à des lentilles électromagnétiques.

L'interaction électrons/matière génère des électrons secondaires de basse énergie qui sont accélérés vers un détecteur d'électrons secondaires qui amplifie le signal.

La quantité d'électrons émise est liée à la topographie de surface et à la composition de l'échantillon.

Des lentilles de balayage parcourues par des courants synchronisés permettent de soumettre la sonde à un balayage du même type que celui d'un écran cathodique.

L'image est la représentation de la surface pixel par pixel. Le niveau de gris de chaque pixel correspond à l'intensité collectée localement par le détecteur d'électrons.

Les électrons se déplacent dans le microscope électronique dans lequel règne un vide. Le balayage à effet de champ (FEG Field Emission Gun) permet d'extraire les électrons via une cathode métallique très fine. L'amélioration de la résolution révélera des détails de surface supérieurs à un MEB conventionnel [29].

III.1.3. Avantages et Limitations

Les avantages du MEB [30] incluent :

Haute résolution : capable d'atteindre une résolution inférieure à 5 nm.

Grande profondeur de champ : permet une visualisation détaillée des surfaces complexes.

III.1.4. Résultats d'imagerie MEB

Cas de nanotube de carbone

Description : Les nanotubes de carbone (CNT) sont des structures cylindriques constituées de carbone, possédant des propriétés mécaniques et électriques exceptionnelles[31].

Morphologie : Les images obtenues montrent la structure allongée et l'organisation des nanotubes, permettant d'évaluer leur diamètre et leur longueur. Par exemple, les nanotubes de carbone monoparoï apparaissent comme des tubes uniques, tandis que les nanotubes multiparoï montrent plusieurs couches concentriques.

Distribution : La MEB permet également d'observer la distribution et l'agglomération des nanotubes dans un échantillon, ce qui est crucial pour leur intégration dans des composites ou d'autres applications.

III.2. Microscopie Électronique à Transmission (MET)

Permet d'observer la structure interne des nanomatériaux à l'échelle atomique, fournissant des informations détaillées sur leur composition et arrangement. La microscopie électronique en transmission (MET), connue sous le nom de Transmission Electron Microscopy (TEM) en anglais, est une technique de microscopie qui utilise un faisceau d'électrons pour examiner des échantillons très fins [32].

III.2.1. Equipment

Source d'Électrons : Un canon à électrons produit le faisceau d'électrons. Cela peut être un filament de tungstène ou un gun à émission de champ, qui émet des électrons par thermionique ou par émission de champ.

Système de Lentilles : Lentilles Condensatrices : Elles concentrent le faisceau d'électrons sur l'échantillon.

Lentilles Objectif : Elles focalisent les électrons qui passent à travers l'échantillon pour former une image intermédiaire.

Lentilles Projecteur : Elles agrandissent l'image intermédiaire pour la projeter sur un écran ou un détecteur.

Système de Vide : Un système de vide est essentiel pour éviter toute interaction entre le faisceau d'électrons et les molécules d'air, ce qui pourrait dégrader la qualité de l'image.

Détecteurs : Des détecteurs tels que des caméras CCD (Charge-Coupled Device) sont utilisés pour capturer les images TEM. D'autres détecteurs peuvent analyser la composition chimique à l'aide de spectromètres.

Ordinateurs et Logiciels de Contrôle : Les TEM modernes sont souvent contrôlés par ordinateur, permettant des réglages précis et une acquisition efficace des données.[32]

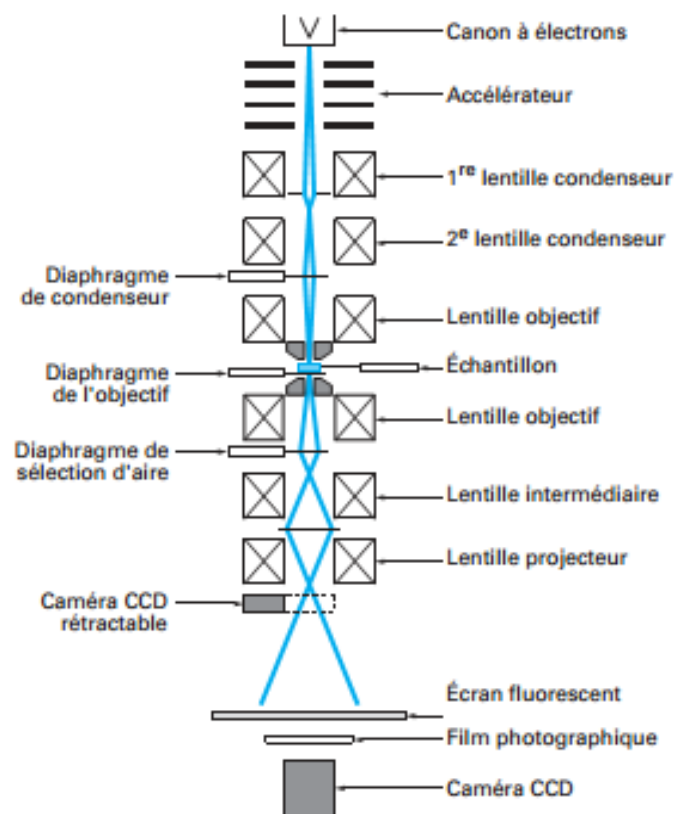


Figure.5 : Schéma du microscope électronique à transmission conventionnel (TEM) [34].

III.2.2.Principe de fonctionnement

Dans un microscope électronique en transmission, un faisceau d'électrons est transmis à travers un échantillon très mince. Les électrons interagissent avec l'échantillon, produisant différents signaux qui sont ensuite détectés pour former une image.

Le principe du TEM repose sur la diffraction des électrons. Lorsque le faisceau traverse un échantillon cristallisé, il est diffracté : l'intensité du faisceau incident est répartie sur quelques faisceaux émis dans des directions bien distinctes (directions d'interférence constructive). Ceux-ci se recombinent pour former l'image, grâce aux lentilles magnétiques [33].

Le TEM a deux principaux modes de fonctionnement [33][34]:

Mode Image : Le faisceau électronique interagit avec l'échantillon suivant l'épaisseur, la densité ou la nature chimique de celui-ci, ce qui conduit à la formation d'une image contrastée dans le plan image. En plaçant le détecteur dans le plan image, on peut observer l'image par transparence de la zone observée.

Mode Diffraction : Ce mode exploite le comportement ondulatoire des électrons. Lorsque le faisceau traverse un échantillon cristallisé, il est diffracté, permettant d'obtenir un cliché de diffraction.

La résolution du TEM peut atteindre jusqu'à 0,08 nanomètre, voire 0,04 nm, permettant d'observer des détails à l'échelle atomique [33][34].

III.2.3. Avantages et limitations

Avantages

Haute résolution : La MET peut atteindre une résolution de 0,08 nm, voire 0,04 nm, permettant d'observer des détails à l'échelle atomique [33].

Combinaison de l'image et de la diffraction : La MET permet de combiner les informations de l'image avec celles de la diffraction, offrant une analyse structurale détaillée [34].

Analyse chimique : En étudiant le rayonnement X provoqué par le faisceau électronique, il est possible d'identifier la composition chimique de l'échantillon [33].

Résolution non limitée par la longueur d'onde : Contrairement aux microscopes optiques, la résolution de la MET n'est pas limitée par la longueur d'onde des électrons, mais par les aberrations des lentilles magnétiques [34].

Limitations

Préparation d'échantillons complexe : Les échantillons doivent être extrêmement minces (quelques dizaines de nanomètres) pour permettre la transmission des électrons, ce qui nécessite une préparation spécifique et délicate [33].

Environnement sous vide requis : Le microscope électronique en transmission nécessite un environnement sous vide poussé pour éviter les interactions entre les électrons et les molécules d'air, ce qui limite le type d'échantillons pouvant être analysés [34].

Coût élevé : Les microscopes électroniques en transmission sont des instruments coûteux à l'achat et à l'entretien, nécessitant un personnel qualifié pour leur utilisation et maintenance [33].

Aberrations des lentilles magnétiques : Bien que la résolution ne soit pas limitée par la longueur d'onde des électrons, elle est limitée par les aberrations géométriques, chromatiques et de charge d'espace des lentilles magnétiques [34].

III.3. Microscopie à Force Atomique (AFM)

Utilisée pour mesurer les forces interatomiques et obtenir des images topographiques en trois dimensions, ce qui aide à évaluer la rugosité et les propriétés mécaniques des nanostructures. La Microscopie à Force Atomique (AFM) est une technique de microscopie à sonde locale permettant d'imager la topographie de surface d'un échantillon avec une très haute résolution, allant de quelques nanomètres à plusieurs microns.

III.3.1. Equipement

L'équipement principal d'un microscope à force atomique (AFM) comprend les éléments suivants :

Le Levier et la Pointe Le levier est une pièce flexible sur laquelle est fixée la pointe d'analyse. La pointe est la partie en contact avec l'échantillon. Sa taille nanométrique détermine la résolution de l'AFM. Une pointe fonctionnalisée avec une molécule comme le monoxyde de carbone permet d'obtenir une résolution atomique[35][36].

Le Tube Piézoélectrique Le tube piézoélectrique permet de déplacer la pointe ou l'échantillon dans les directions x, y et z avec une très haute précision. Sous l'effet d'une tension électrique, le tube se contracte ou s'étire, entraînant le mouvement de la pointe ou du support de l'échantillon. La réponse mécanique du tube influence aussi la résolution de l'AFM[36].

Le Détecteur Photodiode Le détecteur permet de mesurer la déviation du levier causée par les interactions entre la pointe et l'échantillon. Un faisceau laser est réfléchi sur la face supérieure du levier vers une photodiode à quatre quadrants. Les variations de position du spot laser sur la photodiode sont analysées pour reconstituer la topographie de surface[37].

Le Système de Rétroaction Le système de rétroaction maintient une force constante entre la pointe et l'échantillon pendant le balayage. Il ajuste la position verticale de la pointe ou de l'échantillon en appliquant une tension au tube piézoélectrique. Le signal de rétroaction est enregistré pour reconstruire l'image topographique[35][37].

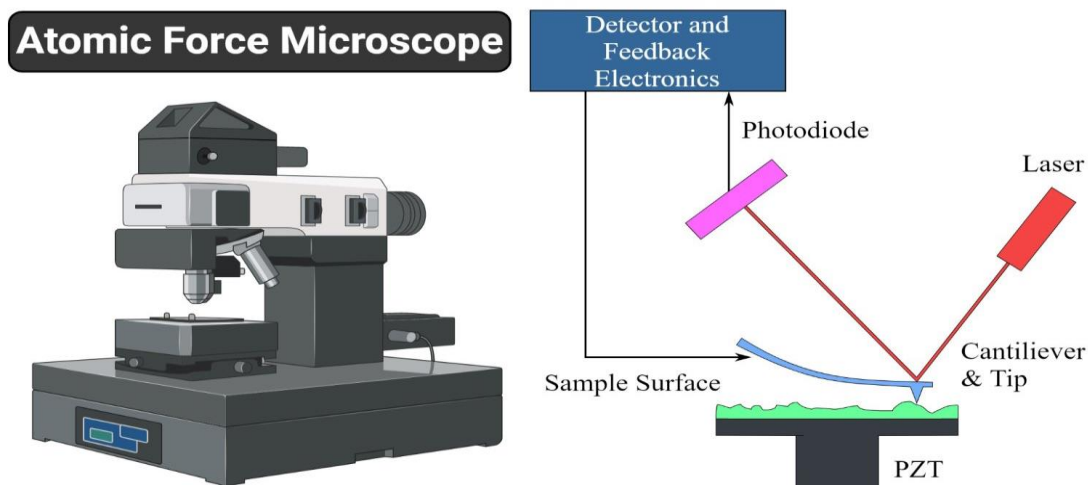


Figure II.7 Atomic Force Microscope (AFM)[38].

III.3.2.Principes de fonctionnement

L'AFM analyse une surface point par point grâce au balayage d'une sonde très fine, appelée pointe, positionnée à l'extrémité d'un micro-levier flexible. Il mesure les forces d'interaction attractive ou répulsive entre les atomes de la pointe et ceux de la surface de l'échantillon. Lorsque la pointe approche de la surface, ces forces entraînent une déviation du levier suivant la loi de Hooke[39][40].

L'AFM peut opérer selon trois principaux modes [41] :

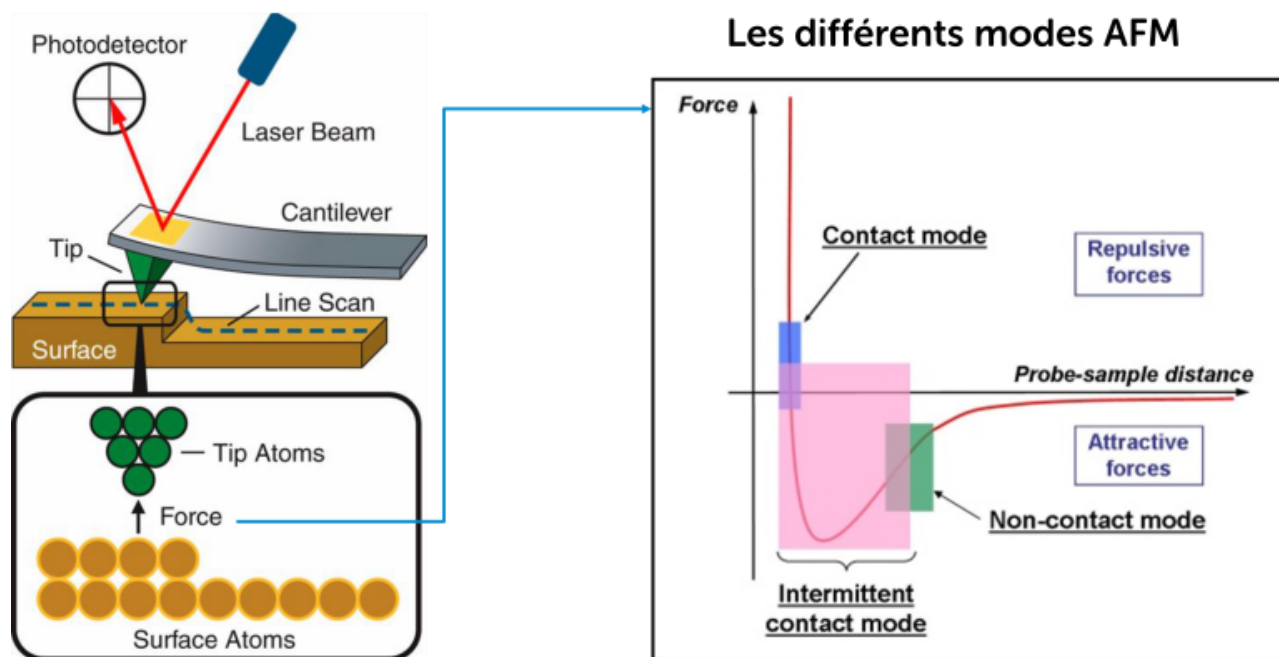


Figure V.8 les différents modes d'AFM

Mode contact : La pointe touche la surface, permettant une mesure directe des forces répulsives.

Mode non-contact : La pointe oscille à une distance fixée de l'échantillon, mesurant uniquement les forces attractives.

Mode tapping : La pointe effectue un contact intermittent, réduisant l'usure sur la pointe et l'échantillon.

En balayant point par point, l'AFM crée une image 3D de la topographie de l'échantillon. La résolution va de quelques nanomètres à quelques microns.

III.3.3. Avantages et limitations

Avantages

Haute Résolution : L'AFM permet d'obtenir une résolution nanométrique, ce qui est essentiel pour l'analyse des surfaces à l'échelle atomique. La résolution latérale peut atteindre jusqu'à 0,1 nm [42][43][44].

Imagerie 3D : Cette technique fournit des images en trois dimensions des surfaces, permettant une meilleure compréhension de la topographie des échantillons [42][43][44].

Conditions Quasi-Physiologiques : L'AFM peut être utilisée pour étudier des échantillons dans des conditions proches de celles du milieu naturel, sans endommager les échantillons, ce qui est particulièrement utile pour les études biologiques [42][43][44].

Mesure des Forces de Surface : L'AFM permet de mesurer les forces d'adhésion et de répulsion entre la pointe et l'échantillon, fournissant des informations cruciales sur les interactions à l'échelle nanométrique [42][43][44].

Applications Diversifiées : Elle est utilisée dans divers domaines, y compris la science des matériaux, la biologie et la nanotechnologie, pour caractériser les surfaces et étudier les propriétés mécaniques et structurales [42][43][44].

Inconvénients

Usure des Pointes : Les pointes très fines utilisées en AFM peuvent s'user rapidement, surtout en mode contact, ce qui peut limiter la durée d'utilisation et nécessiter un remplacement fréquent [42][44].

Temps d'Acquisition Long : Les mesures peuvent prendre beaucoup de temps, car chaque point de la surface doit être analysé individuellement, ce qui rend l'AFM moins efficace pour des échantillons de grande taille [42][44].

Sensibilité aux Vibrations : L'AFM est sensible aux vibrations externes et aux perturbations environnementales, ce qui peut affecter la qualité des images obtenues [42][44].

Coût Élevé : Les équipements AFM sont généralement coûteux à acquérir et à entretenir, ce qui peut constituer un obstacle pour certains laboratoires ou institutions [42][44].

III.3.4. Méthode de quatre pointes

La méthode des quatre pointes est une technique de mesure utilisée pour déterminer la résistivité électrique des matériaux, en particulier des échantillons semi-conducteurs et des films minces. Cette méthode est appréciée pour sa capacité à minimiser les erreurs de mesure dues aux résistances de contact[45-46].

III.3.4.1.Principe de la méthode

Configuration

La méthode implique l'utilisation de quatre pointes métalliques, généralement en tungstène, qui sont disposées en ligne et équidistantes sur la surface de l'échantillon à analyser. Les deux pointes extérieures sont utilisées pour injecter un courant électrique, tandis que les deux pointes intérieures mesurent la tension résultante.

III.3.4.2.Mesure

Un courant est appliqué à travers les pointes externes, et la différence de potentiel est mesurée entre les pointes internes. Cette configuration permet d'obtenir une mesure précise de la résistivité sans être affectée par les résistances de contact entre les pointes et l'échantillon.

Hypothèses

Pour que les résultats soient fiables, certaines hypothèses doivent être respectées :

Les résistances de contact sont considérées comme négligeables.

Le diamètre de contact entre chaque pointe et l'échantillon doit être petit par rapport à la distance entre les pointes.

Le matériau doit avoir une conductivité isotrope et homogène.

Avantages

Précision : En utilisant quatre contacts, la méthode réduit les effets des résistances parasites, ce qui améliore la précision des mesures.

Simplicité : L'instrumentation nécessaire est relativement simple et peut être intégrée dans divers systèmes de mesure.

Applicabilité : Elle est adaptée pour une large gamme de matériaux, y compris les métaux, les semi-conducteurs et certains nanomatériaux.

III.4.Spectroscopie d'impédance

La spectroscopie d'impédance est une technique de caractérisation électrique largement utilisée pour analyser les propriétés des nanomatériaux, en particulier dans le contexte des circuits intégrés. Elle permet d'obtenir des informations détaillées sur la conductivité, la permittivité et d'autres propriétés électriques des matériaux à l'échelle nanométrique.

III.4.1 Équipements utilisés

Pour réaliser des mesures par spectroscopie d'impédance, plusieurs équipements sont nécessaires [47-49] :

Potentiostat/Galvanostat :

Cet appareil génère le signal électrique et mesure le courant résultant. Il permet un contrôle précis des conditions expérimentales, essentiel pour obtenir des données fiables.

Analyseurs d'impédance :

Ces dispositifs sont conçus spécifiquement pour mesurer l'impédance sur une large gamme de fréquences (typiquement de 1 mHz à 10 kHz). Ils fournissent des résultats détaillés sur les caractéristiques électriques du matériau étudié.

Systèmes modulaires :

Des systèmes comme le ModuLab XM MTS offrent une flexibilité pour combiner différentes techniques de mesure (DC et AC), permettant une caractérisation complète des matériaux, y compris les nanomatériaux.

Logiciel d'analyse :

Un logiciel associé permet de traiter les données collectées, facilitant l'interprétation des résultats et la visualisation des caractéristiques d'impédance sous forme de diagrammes Nyquist ou Bode.

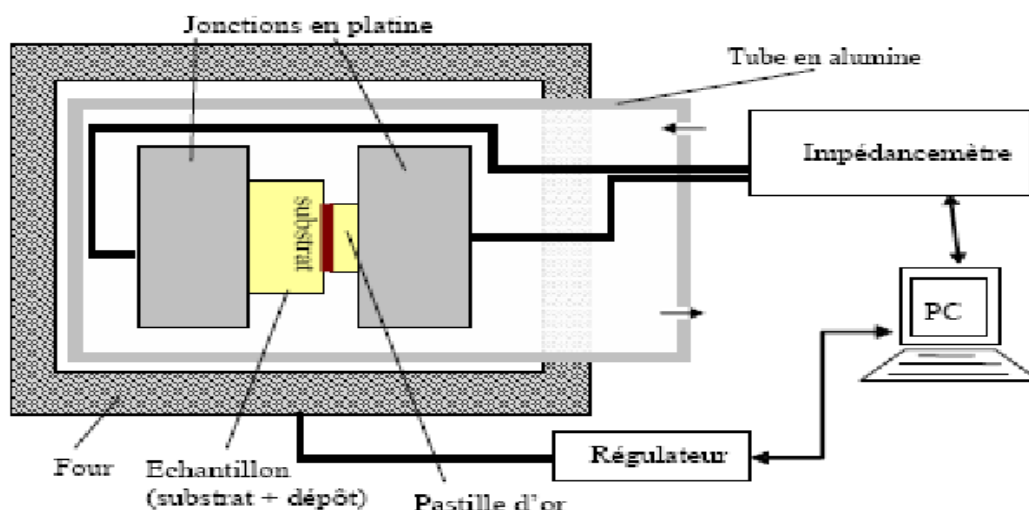


Figure II.9 :Montage utilisé pour la mesure de la conductivité par spectroscopie d'impédance complexe.

III.4.2.Principes de fonctionnement

La spectroscopie d'impédance est une technique qui mesure la réponse d'un système à un signal électrique alternatif (AC) appliqué à différentes fréquences [48-49]. Voici les étapes clés de son fonctionnement :

Application d'un signal sinusoïdal :

Un signal sinusoïdal de faible amplitude est appliqué à l'échantillon. Ce signal est généralement généré à l'aide d'un générateur de signaux.

Mesure de la réponse :

La réponse en courant du système est mesurée, permettant de calculer l'impédance (Z) à chaque fréquence. L'impédance est définie comme le rapport entre la tension (V) et le courant (I) :

$$z = \frac{V}{I} \dots\dots (2.1)$$

Cette mesure inclut également un déphasage entre la tension et le courant, fournissant des informations sur les propriétés résistives et réactives du matériau.

Analyse fréquentielle :

En variant la fréquence du signal appliqué, il est possible d'explorer différents mécanismes de conduction et d'obtenir des informations sur la structure interne du matériau, comme les phénomènes de relaxation et les interfaces.

III.4.3. Avantages et limitation

Avantages

Non-destructivité :

La SIE est une méthode non destructive qui permet d'analyser les systèmes sans les endommager, garantissant ainsi l'intégrité des échantillons pendant l'évaluation.

Analyse détaillée :

Elle fournit des informations approfondies sur la chimie interne des systèmes électrochimiques, permettant de distinguer entre la résistance et la réactance, ce qui aide à comprendre les processus internes tels que le transfert de charge et la diffusion des ions.

Large gamme de fréquences :

La capacité de mesurer l'impédance sur une large gamme de fréquences (généralement de 1 mHz à 100 kHz) permet d'explorer divers mécanismes dynamiques et d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils n'affectent les performances du système.

Maintenance prédictive :

La SIE permet de prédire l'état de santé et les performances futures des dispositifs électrochimiques, facilitant ainsi la maintenance préventive et réduisant les coûts associés aux défaillances imprévues.

Polyvalence :

Cette technique peut être appliquée à une variété de systèmes électrochimiques, y compris les batteries, les électrolyseurs et les piles à hydrogène, rendant son utilisation très versatile dans le domaine de l'énergie.

Collecte de données en temps réel :

Les systèmes modernes de SIE permettent une collecte synchrone des données avec des outils de visualisation en temps réel, facilitant l'analyse détaillée et le retour d'information immédiat.

Limitations

Complexité des données :

L'interprétation des données d'impédance peut être complexe en raison de la nécessité d'analyser plusieurs paramètres simultanément. Cela peut nécessiter une expertise spécialisée pour tirer des conclusions précises.

Sensibilité aux conditions expérimentales :

Les résultats peuvent être influencés par des facteurs externes tels que la température, l'humidité et la composition du matériau, ce qui nécessite un contrôle rigoureux des conditions expérimentales pour obtenir des mesures fiables [49].

Coût élevé de l'équipement :

Les appareils de SIE peuvent être coûteux à acquérir et à entretenir, ce qui peut constituer un obstacle pour certaines installations ou laboratoires avec un budget limité.

Limites dans certaines applications :

Bien que polyvalente, la SIE peut ne pas être adaptée à toutes les applications ou types de matériaux, notamment ceux qui présentent des comportements non linéaires ou complexes qui ne peuvent pas être facilement modélisés par des circuits équivalents simples. [49]

IV. Conclusion

Il est important de tenir compte de différents critères tels que le rendement, le coût, la toxicité, afin de mieux choisir la méthode de synthèse. Dans la synthèse de chaque nanomatériau, toutes les méthodes ne sont pas toutes adaptées.

Chapitre III Étude de modèle et application des nanomatériaux dans les interconnexions circuits intégrés

I. Introduction

On a vu dans les chapitres précédents, les propriétés des nanomatériaux ainsi que leurs applications dans de nombreux domaines importants, en microélectronique ils peuvent jouer un rôle important dans les circuits intégrés notamment dans les interconnexions.

Dans ce chapitre, nous allons explorer et étudier les différentes grandes physiques et caractéristiques des nanomatériaux dans leurs applications pour les interconnexions dans les circuits intégrés.

II. Types d'interconnexions dans les circuits intégrés

Il existe plusieurs classifications des interconnexions, on cite

Interconnexions métalliques : ces interconnexions relient la même couche ou deux couches voisines du circuit. Le cuivre ou l'aluminium sont les principaux matériaux

Interconnexions diélectriques : ces interconnexions diélectriques ont pour but de réduire le couplage capacitif causé par la ligne.

Interconnexions 3D : ces interconnexions sont conçues afin d'intégrer plusieurs circuits intégrés à base de silicium les uns sur les autres, grâce aux techniques 3D. avec ces mêmes techniques, il est possible de réduire simultanément la taille de l'interconnexion ainsi que le temps de transmission.

Défis sont associés avec les interconnexions dans les circuits intégrés

Plusieurs défis sont associés avec les interconnexions notamment :

Dissipation thermique.

Couplage capacitif : rapprocher les interconnexions peut entraîner des conséquences indésirables telle que le couplage capacitif qui peut engendrer une détérioration des performances du circuit.

Fiabilité : doit être conçu pour tolérer certaines conditions variables sans perdre leur intégrité structurale ou fonctionnelle. [59-62]

III. Application des nanomatériaux dans les interconnexions

III.1 Application du cuivre sous forme de nanomatériaux

La figure III.1 représente la paire de fils d'interconnexion en cuivre, ces fils d'interconnexions ont une longueur l , une épaisseur t , une largeur w , la distance entre le centre de la ligne de signal et le blindage au sol D_{sg} et la distance entre deux blindages au sol en tant que d_{gg} . La somme

De la largeur et de l'espacement est appelé pas de fil. Le rapport épaisseur/largeur t/w , est appelé le rapport hauteur/largeur. Les différents paramètres et les dimensions d'interconnexion de cuivre sont représenté dans le tableau III.1

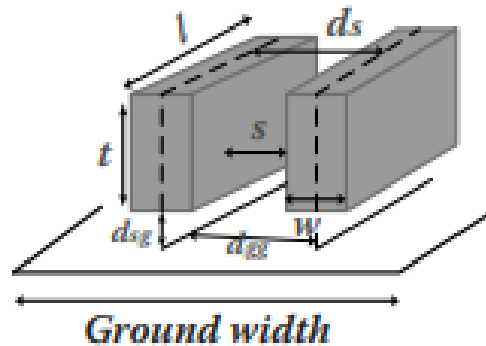


Figure 10 :La géométrie de l'interconnexions à base de cuivre[57]

La résistance d'une interconnexion en cuivre

Les interconnexions à base cuivre avec une forme rectangulaire en 3D sont caractérisé par une résistance équivalente dont l'expression est donne :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot l}{t \cdot w} \dots \dots (3.1)$$

Avec

ρ est la résistivité

L est la longueur

W est la largeur

A savoir R est la résistance 2D ou résistance carré.

Local	Largeur (nm)	32
	Rapport (A/R)	1.8
	épaisseur (nm)	57.6
	hauteur (nm)	54.4
	Résistivité cu ($\mu\Omega.cm$)	2.2
	Constance dielectrique (ϵ_r)	2.2
Global	Largeur (nm)	48
	Rapport (A/R)	2.34
	épaisseur (nm)	112.32
	hauteur (nm)	72
	Résistivité Cu ($\mu\Omega.cm$)	2.2
	Constance diélectrique (ϵ_r)	2.2

Tableau III.1 Dimensions des interconnexions et paramètres structurels des interconnexions à base de cuivre avec une technologie 32 nm. [57]

A cause des conditions de traitement et de fonctionnement spécialisées de l'interconnexion en cuivre sur puce, certains effets non idéaux ne doivent pas être négligés, ce qui fait que la résistivité effective s'écarte de la résistivité globale idéale.

III.1.2 Barrière de diffusion

La figure III.2 montre une couche barrière fine dont la résistivité est élevée. Cette couche construite sur trois côtés d'une interconnexion à base de cuivre sur une puce afin d'empêcher le cuivre de se diffuser dans le diélectrique environnant. Cette couche barrière consomme une partie de la surface transversale allouée à l'interconnexion, réduisant ainsi la section transversale effective de la section du fil et augmente ainsi la résistance. Ajouter à cela, le polissage chimico-mécanique est fait pour lisser et planariser la surface et provoque en outre un bombage qui amincit le métal. Si l'épaisseur moyenne de la barrière est $t_{barrier}$ et que la hauteur est réduite de t_{dish} , la résistance devient

$$R = \frac{\rho}{(t - t_{dish} - t_{barrier})} \cdot \frac{t}{(w - 2t_{barrier})} \dots \dots (3.2)$$

III.1.3 Diffusion surfacique

Lorsque les dimensions de l'interconnexion sont profondément ancrées dans le régime DSM, la résistivité de l'interconnexion augmente à mesure que les dimensions du fil diminuent, cela est dû au phénomène illustré dans la figure III.3. À mesure que les dimensions de la section transversale du fil et la taille des grains deviennent comparables à celles du MFP en vrac d'électrons dans Cu, deux phénomènes physiques majeurs (à savoir la surface diffusion et diffusion aux limites des grains) se produisent sur les électrons porteurs de courant dans Cu en plus du phonon en vrac.

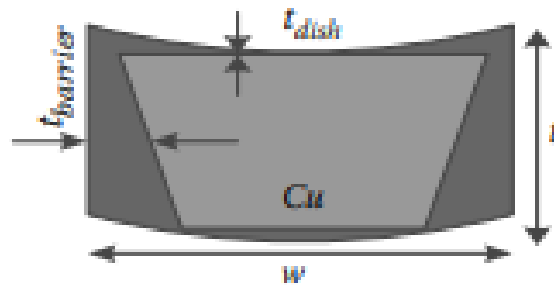


Figure III.2 Coupe transversale d'une interconnexion en cuivre montrant une couche barrière et un bombage en cuivre. [57]

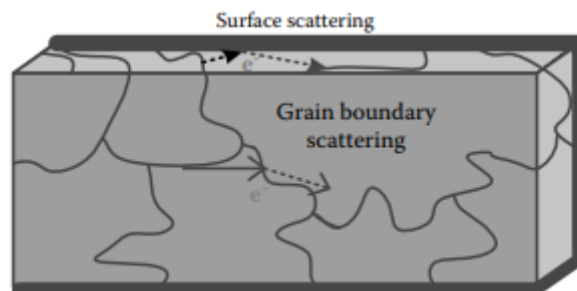


Figure III.3 Illustrations schématiques des diffusions à la surface et aux joints de grains [57]

Le modèle Fuchas-Sondheimer et la théorie de Mayadas et Shatzkes quantifient ces deux effets. Ainsi, compte tenu de l'effet de rugosité de surface et phénomène de diffusion des joints de grains, la résistivité peut être formulé en utilisant le modèle de résistivité de rugosité de surface Fuchas – Sondheimer [63] et le modèle de résistivité de diffusion des limites de grains de Mayadas et Shatzkes [50] comme

$$\rho_{cu} = \rho_{FS} + \rho_{MS} \dots \dots (3.3)$$

$$\frac{\rho_{MS}}{\rho_{bulk}} = 1 + 0.75 \left[\frac{\lambda_{con}(1-P)}{w} \right]^{-1} \dots \dots (3.4)$$

$$\frac{\rho_{MS}}{\rho_{bulk}} = \left[1 - 1.5 + 3\delta^2 - 3\delta^3 \ln\left(1 + \frac{1}{\delta}\right) \right]^{-1} \dots \dots (3.5)$$

$$\delta = \frac{\lambda_{con}}{D} \frac{R}{(1-P)} \dots \dots (3.6)$$

III.1.4 Effet de la température

Des études montrent que le comportement électrique des circuits est influence négativement par les fluctuations de température, cela est principalement dû à l'effet de la diffusion électron-phonon sur le libre parcours moyen, qui détermine la résistance d'interconnexion. Désormais, on considère l'effet de la température sur la résistivité.

$$\rho_{cu}(T) = \rho_{cu}(0) + \left(\frac{AR(\vartheta)T^n}{\vartheta_R^n} \right) \int_0^{\frac{\vartheta_r}{T}} \frac{Z^p}{(e^Z - 1)(1 - e^{-Z})} dZ \dots \dots (3.7)$$

$$R(\vartheta_R) = \frac{h^3}{e^2} \left[\frac{T^n(T^n)T^n}{4^{2/3} a M k_B \vartheta_R} \right] \dots \dots (3.8)$$

Quand la résistivité des interconnexions à l'échelle nanométrique, le cuivre est calculée avec la température de Debye R (320 K), h est la constante de Planck, n est le nombre d'électrons disponibles pour la conduction du courant dans un atome, M est la masse atomique, k_B est la constante de Boltzmann et e est la charge électronique. p est un entier dont la valeur dépend des caractéristiques de l'interaction. Ainsi, la résistance effective d'une interconnexion Cu après prise en compte de tous les effets est donnée par

$$R_{cu}(T, w_{int}) = (\rho_{cu} + \rho_{cu}(T)) \frac{l}{w \times t} \dots \dots (3.9)$$

III.1.5 Estimation de la capacité d'interconnexion

Pour une interconnexion ASIC sur puce, l'estimation de la capacité parasite est la plus importante. Comme le montre la figure III.3, chaque interconnexion est une structure 3D avec des variations importantes de forme, d'épaisseur et de distance verticale par rapport au sol plan ou substrat. De plus, chaque ligne filaire d'interconnexion est généralement entourée d'un nombre d'autres lignes, soit au même niveau, ou bien des niveaux différents.

L'estimation précise des capacités parasites de ces fils d'interconnexion par rapport au plan de masse ou substrat, ainsi que les uns par rapport aux autres, est assez fastidieuse. Bien qu'un solveur de champ 3D, tel que FastCap, fournisse un résultat de capacité précis, il présente des limites en matière de synchronisation et de surcharge de mémoire. De plus, avec l'augmentation rapide de l'intégration, le nombre et la complexité géométrique des interconnexions sur puce augmentent considérablement. Il n'est donc pas pratique d'appliquer un solveur de champ à un CI entier.

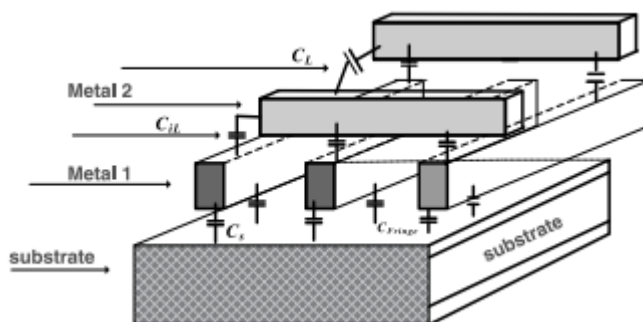


Figure III.4 Vues simplifiées de six interconnexions sur trois niveaux différents, proches les unes des autres [57]

La capacité du fil d'interconnexion comporte deux composants principaux : le parallèle capacité de plaque du bas du fil à la terre et capacité marginale résultant de champs frangeants le long du bord d'un conducteur d'épaisseur finie. De plus, un fil adjacent à un deuxième fil sur la même couche peut présenter une capacité à ce voisin. Pour comprendre ces composants dans un premier temps, considérons la section d'un interconnexion unique, illustrée à la figure 2.26. On suppose qu'un segment d'interconnexion de longueur l , de largeur w et d'épaisseur t est parallèle à la surface et est séparé du plan de masse par une couche diélectrique de hauteur h .

Or, l'estimation correcte de la capacité parasite par rapport à la terre est une question importante. En utilisant la géométrie de base illustrée sur la figure 2.27, on peut

calculer la capacité à plaques parallèles du segment d'interconnexion à partir du classique formule de capacité à plaques parallèles comme

$$C = \frac{\epsilon_{ox}}{h} w \cdot l \dots \dots \dots (3.10)$$

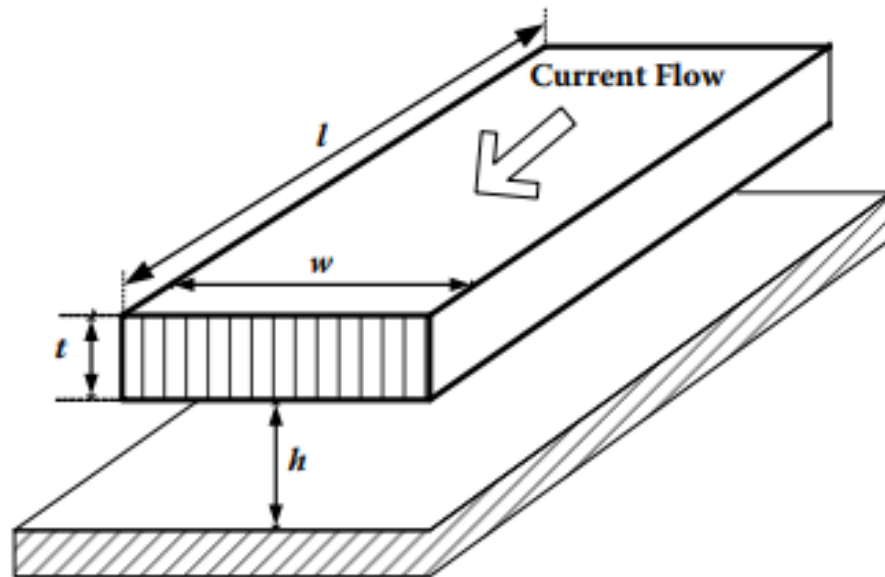


Figure III.5 Segment d'interconnexion parallèle à la surface, utilisé pour les estimations de résistance parasite et de capacité. [57]

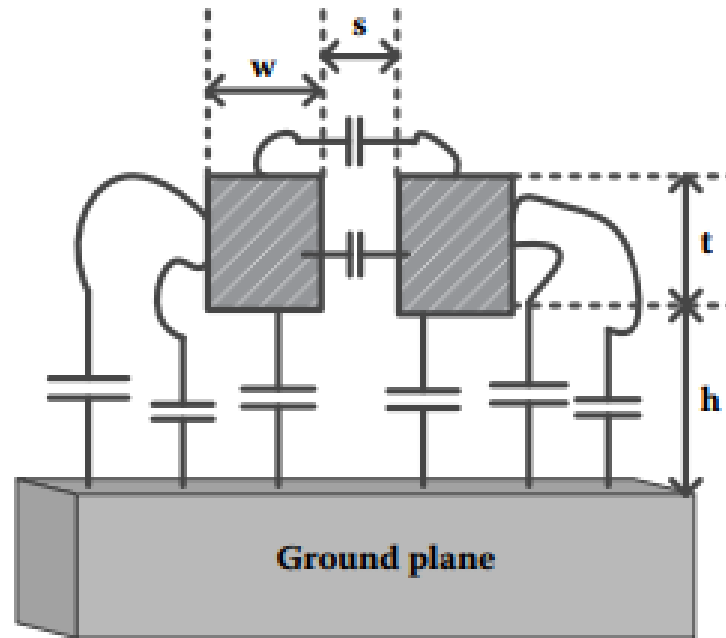


Figure III.6 Effet des champs marginaux sur la capacité. [57]

Cependant, dans les lignes de fils d'interconnexion où l'épaisseur du fil (t) est comparable en à la distance au plan de sol (h), les champs électriques marginaux augmentent considérablement la capacité parasite totale (Figure III.5). C'est un fait bien connu que la technologies DSM permettent de baisser assez considérablement la largeur des lignes métalliques, mais l'épaisseur de la ligne doit être préservée afin d'assurer l'intégrité structurelle. Cette situation qui implique des lignes métalliques étroites avec une épaisseur verticale considérable rend ces lignes d'interconnexion particulièrement sensible aux effets de champs marginaux.

Un certain nombre d'auteurs ont proposé des approximations pour calculer le champ marginal calcul de capacité [51] [52] [57]. Un ensemble de formules simples développées par Yuan et Trick dans le début des années 1980 peut être utilisée pour estimer la capacité des structures d'interconnexion dans lesquels les champs marginaux rendent complexe le calcul de la capacité parasite.

Ici, comme représenté dans la figure III.6, un conducteur isolé au-dessus d'un plan de masse est supposé être un conducteur rectangulaire partie médiane avec deux embouts hémisphériques.

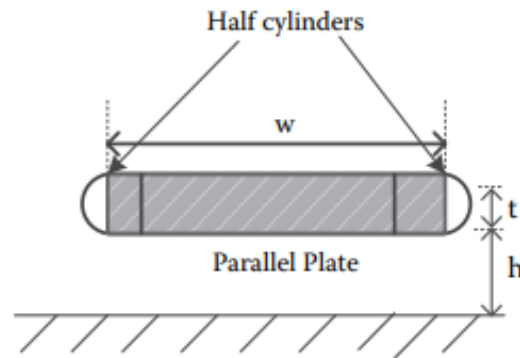


Figure III.7 Modèle de capacité Yuan et Trick incluant les champs marginaux. [57]

La capacité totale est supposée être la somme d'un condensateur à plaques parallèles de Largeur $(w - \frac{t}{2})$ et un condensateur cylindrique dont le rayon est $(\frac{t}{2})$. On donne alors l'expression

$$C = l\epsilon_{ox} \left[\frac{w - \frac{t}{2}}{h} + \frac{2\pi}{\ln\left(1 + \frac{2h}{t} + \sqrt{\left(\frac{2h}{t}\right)^2 + 2}\right)} \right]$$

.....(3.11)

On donne la formule empirique est computationnel et relative [4] [8]

$$C = \epsilon_{ox} l \left[\frac{w}{h} + 0.77 + 1.06 \left(\frac{w}{h}\right)^{0.25} + 1.06 \left(\frac{t}{h}\right)^{0.5} \right]$$

.....(3.12)

L'expression ci-dessus est valable si l'on suppose que la ligne d'interconnexion est complètement isolée des structures environnantes. Mais dans un scénario réel de processus métalliques à plusieurs niveaux dans un circuit intégré, la ligne d'interconnexion est généralement couplée à d'autres lignes fonctionnant en parallèle. Dans des cas similaires, la capacité parasite totale de la ligne est non seulement augmentée par les effets de champ marginal, mais également par le couplage capacitif entre les lignes voisines parallèles adjacentes. En raison de la mise à l'échelle, lorsque l'épaisseur du fil d'interconnexion devient comparable à sa largeur, le couplage capacitif entre les lignes d'interconnexion voisines devient alors important. En raison de l'entassement, lorsque l'épaisseur du

Le fil d'interconnexion devient comparable à sa largeur, alors le couplage capacitif entre les lignes d'interconnexion voisines devient important. Ce couplage entre les lignes d'interconnexion adjacentes

sont principalement responsables de la diaphonie du signal, lorsque les transitions dans une ligne peuvent provoquer du bruit dans les autres lignes voisines.

III.1.6.L'inductance d'interconnexion

Dans la plupart des scénarios, seules la résistance et la capacité d'interconnexion sont prises en compte pour modéliser l'impédance sur puce afin de calculer le retard d'Elmore. Par rapport à la résistance et à la capacité, l'inductance d'interconnexion est beaucoup plus difficile à extraire et à modéliser, les ingénieurs préfèrent donc concevoir de telle manière que les effets inductifs soient négligeables. Néanmoins, l'inductance doit être prise en compte dans les conceptions à grande vitesse pour les fils larges tels que les horloges et les bus de puissance . [54] [57]

Généralement, l'extraction de l'inductance constitue un problème tridimensionnel et prend beaucoup de temps, en particulier pour les géométries de fils complexes. Une des raisons de cette difficulté est due à la définition de l'inductance basée sur la boucle :

$$L_{ij} = \frac{\varphi_{ij}}{I_j} \dots \dots (3.13)$$

Sachant que

Ψ_j est le flux magnétique dans la boucle i induit par le courant I_j dans la boucle j.

Pour la former une boucle, il faut identifier les chemins de retour du courant. La répartition du courant dans un circuit dépend en grande parties des caractéristiques d'interconnexion. Dans le cas d'interconnexions globales étendues, l'effet d'inductance est assez significatif dans les couches métalliques supérieures plutôt que celui des interconnexions locales dans les couches métalliques inférieures. La difficulté rencontrée dans l'extraction des inductances est principalement due à deux raisons. Premièrement, les fils des couches adjacentes sont généralement orthogonaux et les couches adjacentes ne peuvent donc plus être traitées comme un plan de masse comme dans l'extraction de capacité. La deuxième raison est due aux effets de couplage inductif à longue portée. L'action de limiter artificiellement l'extraction de l'inductance aux géométries proches introduit non seulement des imprécisions, mais peut aussi bien engendrer des modèles instables. Ainsi, la méthode de mise en correspondance de motifs utilisée pour l'extraction de capacité ne peut pas être appliquée à l'extraction d'inductance en raison des géométries complexes entourant le fil.

Par conséquent, on peut affirmer que, comme la valeur de l'inductance dépend de la boucle entière et ne peut pas être simplement décomposée en sections comme dans le cas de la capacité, il est donc peu pratique d'extraire l'inductance d'une configuration de puce. Au lieu de cela, l'inductance est généralement extraite à l'aide d'outils tels que Fast Henry [54] pour des structures de test simples

destinées à capturer les pires cas sur la puce. Mais, pédagogiquement, le calcul analytique de l'inductance d'un conducteur (Figure III.7) de longueur l et de largeur w situé à la hauteur d_{sg} au-dessus d'un plan de masse est approximativement formulé comme suit :

$$L = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{w+t} \right) + 0.5 + \left(\frac{0.22(w+t)}{l} \right) \right] \dots \dots (3.14)$$

$$M_{gg} = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{d_{gg}} \right) - 1 + \frac{d_{gg}}{l} \right] \dots \dots (3.15)$$

$$M_{sg} = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{d_{sg}} \right) - 1 + \frac{d_{sg}}{l} \right] \dots \dots (3.16)$$

ou $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ H/m est perméabilité,

M_{sg} est l'inductance magnétique entre centre du réseau de signaux individuels et du blindage de masse.

M_{gg} est l'inductance magnétique se situe entre les centres de deux boucliers de terre.

III.1.7 Effet en haute fréquence

Dans les hautes fréquences, la densité de courant dans un fil d'interconnexion n'est plus uniforme. A cause d'un phénomène appelé effet de peau, le courant a tendance à circuler près de la surface de l'interconnexion. Cet effet de peau réduit la section efficace des conducteurs épais et augmente la résistance effective à haute fréquence. La profondeur de peau d'un conducteur est la distance sous la surface du conducteur où la densité de courant chute à 1/e de celle à la surface, et est déterminée comme suit :

$$S(f) = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \dots \dots (3.17)$$

où est la perméabilité magnétique du diélectrique en espace libre. Il a été observé que lorsque la fréquence augmente jusqu'à plusieurs dizaines de GHz, la profondeur de la peau entre dans la région DSM et diminue lentement. Dans une puce dotée d'un bon réseau électrique, de bons chemins de retour du courant sont généralement disponibles de tous les côtés. Il est donc préférable de supposer que le courant circule dans une coque épaisse le long des quatre côtés du conducteur, comme le montre la figure II.7 La prise en compte de ces effets non idéaux dépend des exigences de précision des modèles et du régime de fonctionnement des circuits. Souvent, plusieurs effets doivent être pris en compte simultanément. Par exemple, l'effet de peau et l'effet de diffusion de surface, lorsqu'ils sont pris en compte simultanément, sont connus sous le nom d'effet de peau anormal (ASE).[57]

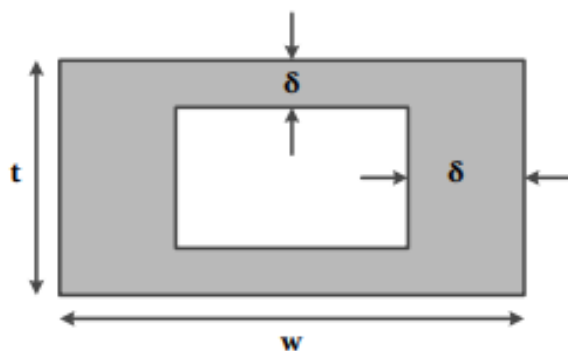


Figure III.8: Flux de courant déterminé par la profondeur de la peau. [57]

7

III.2. Application des matériaux en carbones

III.2.1. Les nanotubes de carbones

III.2.1.1. Nanotubes de carbones monoparois SWNCT

En basant sur la théorie de Luttinger sur la théorie du liquide. Le circuit électrique équivalent proposé par Bruke Figure III.8 montre le modèle de ligne de transmission d'un CNT isolé. Il est essentiellement modélisé comme un fil quantique 1D. Selon le formalisme de Landauer Buttiker, la conductance d'un fil quantique 1D avec Γ canaux en parallèle est donnée par

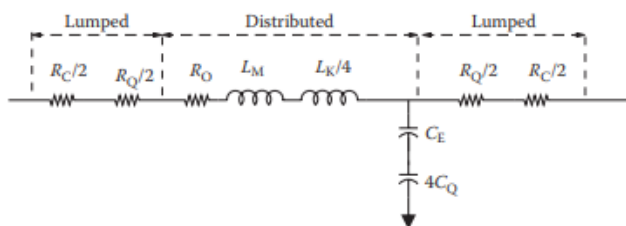


Figure III.9 Modèle de ligne de transmission d'un CNT isolé. [58]

$$C = \frac{e^2}{h} \Gamma T \dots\dots(3.18)$$

Avec :

h est la constante de planck

e charge électronique

Γ is nombre de chaines

T est la probabilité de transmissions

On donne la relation pour déterminer la résistance Rq quantique

$$R_Q = \frac{h}{4e^2} \dots \dots \dots (3.19)$$

On donne la relation qui détermine la résistance quantique fondamentale d'un nanotube de carbone isolé de longueur inférieure à que l'électron

$$R_{CNT} = R_C + R_Q + R_O = R_C + \frac{h}{4e^2} \left(1 + \frac{l}{\lambda_{CNT}}\right) \dots \dots \dots (3.20)$$

La résistance de contact et la résistance quantique sont indépendantes du CNT longueur et sont donc modélisés par deux valeurs groupées RC/2 et RQ/2 à les deux extrémités.

En plus de l'inductance magnétique (LM) et de la capacité électrostatique (CE) du modèle d'interconnexion traditionnel, il existe l'inductance dite "cinétique" (LK) et la capacité dite "quantique" (CQ). Un nanotubes de carbone isolé de diamètre d à hauteur h au-dessus d'un plan de sol est représenté sur la figure III.9. [58]

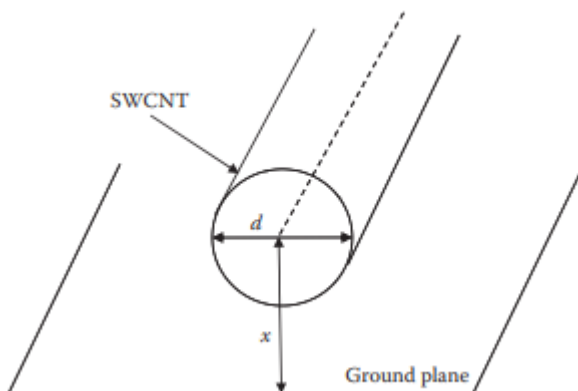


Figure III.10 CNT sur un plan de masse[58]

L'inductance magnétique est donnée par

$$L_M = \frac{h}{2\pi} \ln\left(\frac{x}{d}\right) = \frac{h}{2\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{x}{d}\right) \dots \dots \dots (3.21)$$

Avec

d représente le diamètre du NTC

x représente la hauteur du NTC depuis le plan de masse

L'inductance cinétique est donnée par

$$L_K = \frac{h}{2e^2v_F} \dots \dots (3.22)$$

Où v_F est la vitesse de Fermi, qui est de 8×10^5 m/s pour les NTC. Il est important de noter que pour un NTC isolé, l'inductance magnétique est insignifiante et l'inductance cinétique domine. Comme il y a quatre canaux conducteurs dans un CNT, l'inductance cinétique effective d'un CNT isolé est $L_K/4$.

La capacité électrostatique est donnée par

$$C_E = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(x/d)} \dots \dots (3.23)$$

La capacité quantique est donnée par

$$C_Q = \frac{2e^2}{Hv} \dots \dots (3.24)$$

III.2.1.2 Nanotube de carbon multiparois MWCNT

Les NTC à parois multiples MWCNT est une structure de CNT constitué de plusieurs coques concentriques de feuilles de graphène laminées, comme le montre la figure III.10. Le diamètre des MWCNT varie de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de nanomètres. Bien que les SWCNT sont dotée de la propriété d'être métalliques ou semi-conducteurs en fonction de leur chiralité, les MWCNT reste toujours métalliques. [58]

De plus, les MWCNT ont une capacité de transport de courant semblable à celle des SWCNT métallique, mais sont plus faciles à fabriquer que les SWCNT grâce à un contrôle plus facile du processus de croissance. Un MWCNT isolé sur un plan de masse infini est illustré à la figure III.10. La séparation entre le centre du nanotube et le sol est x , le diamètre de la coque la plus externe est D_{max} , le diamètre de la coque la plus interne est D_{min} et l'intervalle entre deux coques adjacentes est $\delta = 0,34$ nm, ce qui correspond au gap de Van der Waals.

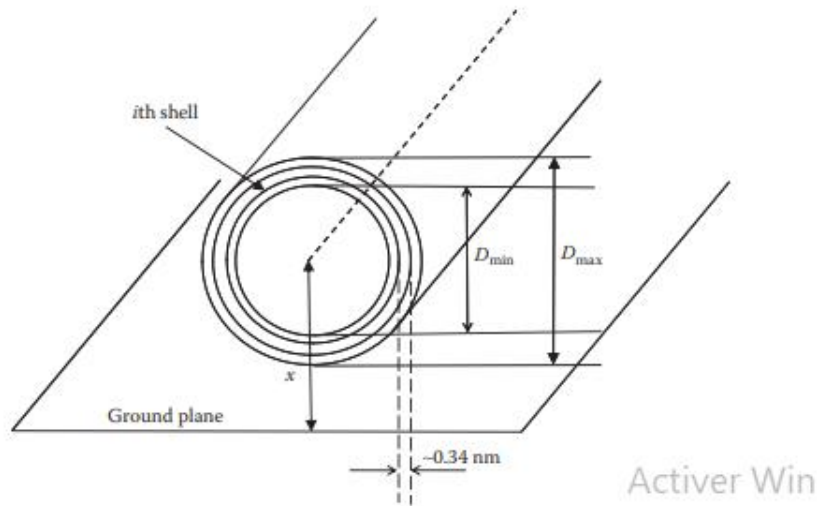


Figure III.11 Les nanotubes MWCNT sur un plan au sol[58]

Le modèle de circuit des MWCNT est beaucoup plus complexe que le modèle d'interconnexion distribué RLC traditionnel. Chaque coque des MWCNT a des paramètres différents et il existe des couplages entre coques voisines.

III.2.1.2.1. Modélisation des canaux conducteurs

Le nombre de coquilles dans MWCNT dépend du diamètre, c'est-à-dire

$$M_{shell} = 1 + \frac{D_{max} - D_{min}}{2\delta} \dots\dots(3.25)$$

Le nombre de canaux conducteurs (en tenant compte de la dégénérescence du spin) dans tout la coquille est donnée par

$$M_{shell}(D) = \alpha D + \beta \dots\dots(3.26)$$

Le rapport Dmin/Dmax est supposé être d'environ 1/2, dans la modélisation fonctionne et. La même chose est soutenue par les travaux expérimentaux de. Ainsi, le nombre d'obus v du MWCNT est déterminé par

$$v = 1 + \text{Integer} \left[\frac{(D_{max} - D_{max}/2)}{2\delta} \right] \dots\dots(3.27)$$

où Integer[] indique que seule la partie entière est prise en compte. Si nous désignons les coques de l'extérieur vers l'intérieur par 1, 2, ..., k, ..., v, le diamètre de la k^{ème} coque est donné par

$$D_k = D_{max} - 2\delta(k - 1) \text{ pour } 1 \leq k \leq v \dots \dots (3.28)$$

avec δ est l'espace de Van der Waals et est égal à 0,34 nm. Le plus intérieur le diamètre sur la est

$$D_{min} = D_{min} - 2\delta(k - 1) \dots \dots (3.29)$$

Notez que, bien que le rapport D_{min} / D_{max} soit supposé être de 1/2, D_{min} peut être supérieur à $D_{max}/2$ car D_{max} peut ne pas être un multiple entier de δ . Le nombre de canaux conducteurs de la k^{ème} coque est donné par

$$M_k = \alpha D_k + \beta \dots \dots (3.30)$$

Ainsi, le nombre total de canaux conducteurs (M) est donné par la somme des canaux conducteurs (M_k) de toutes les coques

$$M = \sum_{k=1}^v M_k \dots \dots (3.31)$$

III.2.1.2.2 Résistance d'une coque

La résistance d'une coque se compose de trois parties : la résistance de contact quantique R_Q , la résistance ohmique induite par diffusion R_O et la résistance de contact imparfaite R_C . La R_O ne se produit que si la longueur du nanotube est supérieure à celle du MFP électronique. R_Q et R_O sont intrinsèques et R_C est dû au processus de fabrication.

La valeur de la résistance intrinsèque de chaque coque est déterminée par

$$R_{shell}^k = R_Q^k + R_O^k = \frac{h}{2e^2 M_k} \left(1 + \frac{l}{\lambda_k}\right) \dots \dots (3.32)$$

Sachant que

$$R_{shell}^k = R_Q^k + R_O^k = \frac{h}{2e^2 M_k} + \frac{h}{2e^2 M_k} \cdot \frac{l}{\lambda_k} \dots \dots (3.34)$$

l , λ_k et M_k sont respectivement la longueur, le MFP et le nombre de canaux conducteurs de la k^{ème} coque dans le MWCNT

La résistance de contact imparfait R_C peut varier de 0 à 100 k Ω pour différents processus de croissance. Récemment, il a été démontré que dans les MWCNT pourrait être très faible par rapport à la capacité de résistance totale avec la terre, alors que les coques internes sont blindées. Le circuit équivalent d'un MWCNT ayant v nombre de coques est illustré à la figure II.11.

III.2.1.2.3 L'inductance monocouche

L'inductance cinétique de la k ième coque est donnée par

$$L_K^k = \frac{L_K}{2M_k} \dots\dots(3.35)$$

L'inductance magnétique de chaque coque est négligeable (~pH/μm) par rapport à l'inductance cinétique.

III.2.1.2.4. La capacité d'une seul coque

La capacité quantique de la kième coque est donnée par

$$C_Q^k = C_Q \times 2M_K \dots\dots(3.36)$$

La capacité électrostatique de la k ième coque est donnée par

$$C_E = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(1.5D_{max}/D_{min})} \dots\dots(3.37)$$

la capacité mutuel de la kième coque est donnée par

$$C_Q^{k,k+1} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D_{k+1}/D_k)} \dots\dots(3.38)$$

III.2.1.2.5. Equivalence RLC dans les NTCs multiparois :

La résistance totale peut être calculée comme la combinaison parallèle du nombre v de résistances dues à chaque coque et est donnée par

$$R_{MWCNT} = \left[\frac{1}{\sum_{k=1}^v 1/R_{shell}^k} \right] \dots\dots(3.2)$$

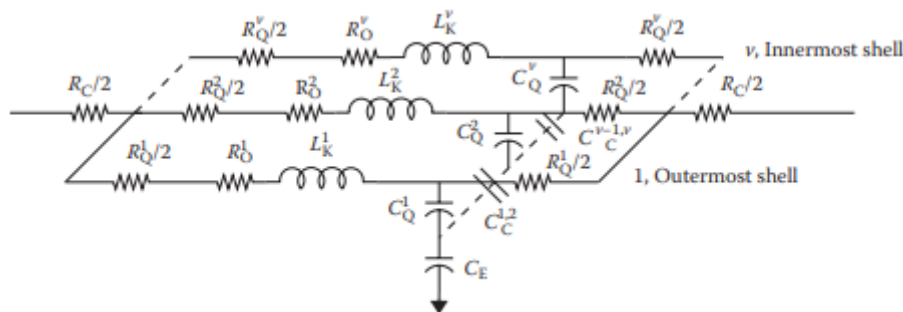


Figure III.12 Circuit équivalent d'un MWCNT ayant v nombre de coques[58]

L'inductance cinétique des coques conductrices est donne

$$L_{MWCNT}^K = \left[\frac{1}{\sum_{k=1}^v \frac{1}{L_k^k}} \right] \dots\dots(3.39)$$

La capacité quantique des coques conductrices total est donne

$$C_{MWCNT}^Q = \sum_{k=1}^v C_Q^k \dots\dots(3.40)$$

III.2.1.3.Faisceau SWCNT

Le fil d'interconnexion est formé d'un faisceau de SWCNT identiques, comme le montre la figure III.12 Si w et t sont respectivement la largeur et l'épaisseur de l'interconnexion, le nombre de NTC dans les directions x et z peut être exprimé comme suit

$$P_x = \frac{w-d}{y} \dots\dots(3.41)$$

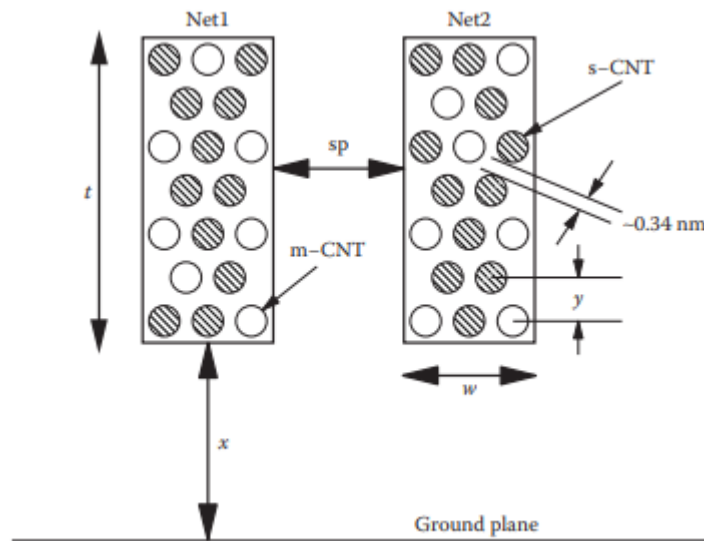


Figure III.13 Structure d'interconnexion utilisant le bundle SWCNT[58]

$$q_z = \frac{t-d}{\sqrt{3}/2y+1} \dots\dots(3.42)$$

où d est le diamètre du CNT. Pour un faisceau densément compacté, la distance inter-CNT est $y = d + \delta$, où $\delta = 0,34$ nm (espace de van der Waals). En utilisant les expressions p_x et q_z , le nombre total de CNT dans un paquet peut être exprimé comme suit :

$$\begin{aligned}
 n_{CNT} &= p_z q_z - q_z / 2, \text{ if } q_z \text{ is even} \\
 n_{CNT} &= p_z q_z - (q_z - 1) / 2, \text{ if } q_z \text{ is odd} \dots\dots(3.43)
 \end{aligned}$$

En raison du manque de contrôle sur la chiralité, un faisceau est constitué à la fois de nanotubes métalliques et semi-conducteurs. Statistiquement, il a été constaté que la fraction métallique P_m représente un tiers dans un faisceau, c'est-à-dire qu'un tiers des nanotubes sont métalliques et le reste est semi-conducteur. Seuls les NTC métalliques contribuent à la conduction du courant et, par conséquent, le nombre effectif de canaux conducteurs dans un faisceau contenant à la fois des NTC métalliques et semi-conducteurs est inférieur à celui d'un faisceau contenant uniquement des NTC métalliques. Un faisceau contenant uniquement des NTC métalliques est appelé faisceau dense, et un faisceau contenant à la fois des NTC métalliques et semi-conducteurs est appelé faisceau peu compacté. Comme le faisceau peu compacté peut contenir des NTC métalliques entourés de NTC semi-conducteurs, le faisceau peu compacté peut être modélisé en considérant un espacement inter-NCT plus grand, c'est-à-dire $y > d + \delta$.

III.2.1.3.1. La résistance d'un faisceau

La résistance d'un faisceau SWCNT constitué d'un nombre n_{CNT} de SWCNT est exprimée par

$$R_b = \frac{R_{CNT}}{P_m n_{CNT}} \dots\dots(3.44)$$

(3.28) où P_m est la fraction de tubes métalliques dans un faisceau.

III.2.1.3.2. L'inductance d'un faisceau

Les NTC possèdent à la fois des inductances cinétiques et magnétiques. On donne l'expression de l'inductance cinétique est

$$L_b = \frac{L_K/4}{P_m n_{CNT}} \dots\dots(3.45)$$

Srivastava et al. ont calculé l'inductance magnétique du faisceau de NTC en divisant l'inductance magnétique d'un NTC isolé par le nombre de NTC, ce qui sous-estime l'inductance magnétique. L'inductance mutuelle entre les NTC dans un faisceau est négligée. L'inductance magnétique peut être calculée avec précision en suivant la technique de modélisation proposée par Nieuwoudt et Massoud [7] [9]. L'inductance magnétique du faisceau de CNT est calculée en tenant compte des inductances mutuelles entre les NTC dans un faisceau en utilisant l'approche de modélisation d'inductance partielle basée sur la méthode du circuit équivalent à éléments partiels (PEEC). L'auto-inductance partielle (L_m) d'un seul SWCNT est donnée par

$$L_m = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{l}{d} - \frac{1}{2} + \frac{2d}{3l} \right] \dots\dots(3.46)$$

Avec

l est la longueur

d est le diamètre des SWCNT

L'inductance mutuelle entre (M_m) entre deux SWCNT parallèles d'égale longueur est donnée par

$$M_m = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \left(\rho + \sqrt{1 + \rho^2} - \sqrt{1 + \frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\rho}} \right) \right] \dots\dots (3.47)$$

On donne

$\rho = l/y$ et y = est un espacement de centre a un centre entre deux faisceau (voir Figure III.12). Selon la méthode PEEC, l'inductance d'un faisceau :

$$L_b^M = i_b^K L_{mat} i_n \dots\dots(3.48)$$

i_n : i_n est un vecteur avec un courant normalisé dans chaque SWCNT L_{mat} est la matrice d'inductance partielle donnée par

$$L_{mat} = \begin{bmatrix} L_m^1 & M_m^{1,2} & \dots & M_m^{1,n} \\ M_m^{2,1} & L_m^2 & \dots & M_m^{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_m^{n,1} & M_m^{n,2} & \dots & L_m^n \end{bmatrix}$$

Par conséquent, l'inductance effective d'un faisceau SWCNT est la combinaison en série d'inductances cinétiques et magnétiques et peut s'écrire

$$L_b = L_b^K + L_b^M \dots\dots(3.49)$$

III.2.1.3.4.La capacité d'un faisceau

La capacité quantique d'un faisceau de CNT est donnée par

$$C_b^Q = 4C_Q(P_m n_{CNT})l \dots\dots(3.50)$$

La capacité électrostatique d'un faisceau SWCNT est presque égale à celle d'un fil de cuivre de mêmes dimensions de section transversale. Il a également été constaté que la fraction métallique

(Pm) des NTC dans un faisceau n'affecte pas de manière significative la capacité électrostatique. il est aussi rapporté que la capacité d'un faisceau peu compacté avec quatre NTC aux coins est à peine 20 % inférieure à celle d'un faisceau dense. Par conséquent, on peut supposer que la capacité électrostatique d'un faisceau SWCNT est la même que celle d'un fil de cuivre de section identique. Ainsi, la capacité effective du faisceau SWCNT est la combinaison en série de sa capacité électrostatique et de sa capacité quantique.

III.2.1.4. Les Faisceau de MWCNT

Deux structures différentes sont proposées pour l'interconnexion en employant de MWCNT comme le montre la figure III.13. Ces structures ne conviennent que lorsque le rapport hauteur/largeur est de deux. Autrement, des MWCNT de plus petit diamètre doivent être utilisés pour paramétrer les MWCNT dans la section d'interconnexion spécifiée.

La résistance, l'inductance cinétique et la capacité quantique d'un faisceau MWCNT est R_{MWCNT}/n_{CNT} , L_{MWCNT}^K/n_{CNT} et $n_{CNT} \times C_{MWCNT}^Q$, où n_{CNT} est le nombre de MWCNT dans un paquet. L'inductance magnétique d'un MWCNT Le bundle est calculé en utilisant la méthodologie décrite pour les faisceaux SWCNT. la capacité électrostatique et de couplage pour le MWCNT de plus petit diamètre l'interconnexion basée sur un faisceau (Figure III.13a) est la même que celle du fil de cuivre. Pour les faisceaux MWCNT avec de grand diamètre (Figure III.13b), la capacité peut être calculée en utilisant du modèle décrit dans.

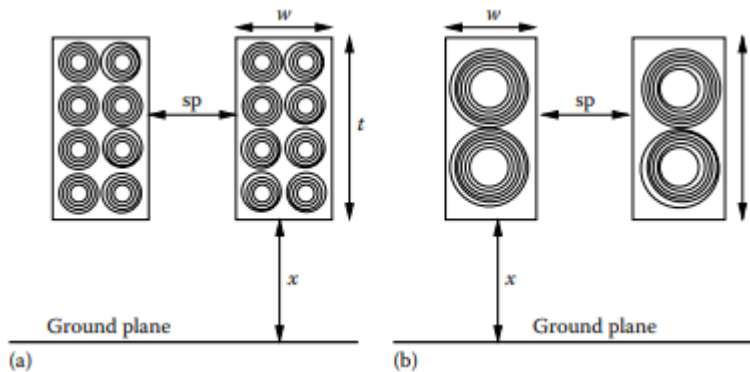


Figure III.14 Structure d'interconnexion utilisant le faisceau MWCNT [58]

III.2.2. L'application des nanorubans de graphène

Dans le graphène, les atomes de carbone sont répartis dans une structure en nid d'abeille, comme illustré à la figure III.14. Bien que GNR et CNT soient dérivés à partir de la structure de base du graphène, il existe des différences est due à des conditions limites.. Dans les NTC, la fonction d'onde est périodique le long de la circonférence. Dans les GNR, la fonction d'onde disparaît à la frontière des deux bords

Selon l'orientation des atomes de carbone (zigzag ou armchair), le bord du graphène le drap est soit en armchair, soit en zigzag. GNR est toujours métallique, alors que Le nanorubans de graphène armchair GNR peut être semi-conducteur ou métallique selon le nombre d'anneaux de carbone sur toute la largeur. Pour les applications d'interconnexion, le GNR en zigzag est proposé en raison de sa propriété métallique.

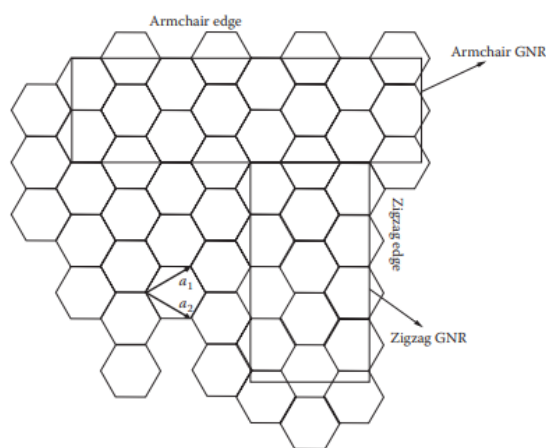


Figure III.15 Structure de nid d'abeille d'une feuille de graphène[58]

En raison de la haute résistance du GNR monocouche, une structure GNR multicouche est proposé pour les interconnexions. Une structure GNR multicouche est modélisée pour l'interconnexion VLSI, comme le montre la figure III.15.

Pour le nœud technologique 16 nm. Le nombre de couches de graphène est donné par

$$M_{layer} = 1 + \text{Integer} \left[\frac{t}{\delta} \right] \dots(3.51)$$

La figure III.16 montre le diagramme schématique d'un modèle d'interconnexion avec un driver et une charge aux deux extrémités de l'interconnexion. Dans la figure III.16, l'interconnexion est modélisée par un réseau RLC distribué, où RC est la résistance en raison de contacts imparfaits, RQ est la résistance quantique et RS (= RQ/λ) est la résistance de diffusion p.u.l., où λ est le MFP de l'électron dans GNR. Le la résistance quantique est définie comme

On suppose que λ est égal à 1 μm

$$R_Q = \frac{h/2e^2}{M_{ch}M_{layer}} \dots\dots(2.52)$$

Sachant que

M_{ch} est le nombre de canaux conducteurs dans une couche

M_{layer} est le nombre de couches GNR

h constante de Planck ($= 6.626 \times 10^{-34}$ J-s)

e charge électronique ($= 1.6 \times 10^{-19}$ C)

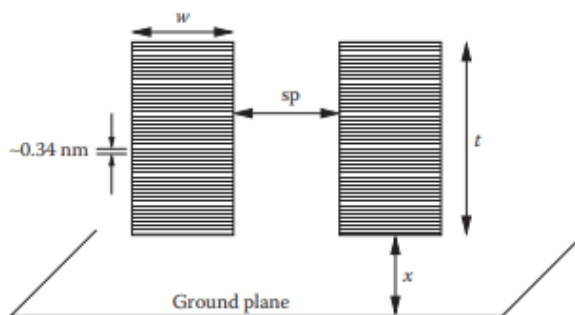


Figure III.16 Structure des nanorubans de Graphene multicouche. [58]

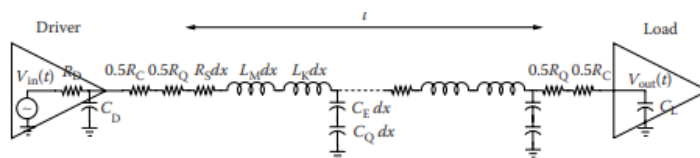


Figure III.17 Schéma du modèle d'interconnexion RLC de l'interconnexion GNR[58]

On suppose que λ est égal à $1 \mu m$

L'expression de l'inductance quantique

$$C_Q = M_{ch} M_{layer} \frac{4e^2}{h v_F} = M_{ch} M_{layer} \times 193,18 \text{ af} / \mu m \dots \dots (3.53)$$

Où la vitesse de Fermi est de $v_F = 8 \times 10^5$ m/s pour les nanorubans de graphène.

L'expression de l'inductance cinétique

$$L_b = \frac{\hbar/4e^2 v_F}{M_{ch} M_{layer}} = \frac{8.00884}{M_{ch} M_{layer}} nH/\mu m \dots \dots (3.54)$$

Le nombre de canaux conducteurs dans le graphène monocouche est donné par

$$M_{ch} = \sum_{j=1}^{n_c} [1 + e^{(\varepsilon_{j,n} - \varepsilon_F/k_B T)}]^{-1} + \sum_{j=1}^{n_v} [1 + e^{(\varepsilon_F + \varepsilon_{j,n})/k_B T}]^{-1} \dots \dots (3.55)$$

ou:

j ($= 1, 2, 3, \dots$) est un entier positif

ε_F énergie de fermi

k_B est la constante de Boltzmann

T est la température absolue

n_c and n_v sont le nombre de sous-bandes de conduction et de valence, respectivement $\varepsilon_{j,n}$ et $\varepsilon_{j,h}$, sont les énergies de l'électron et du trou dans la j ème sous-bande, telles que données par

$$\varepsilon_j = \frac{\hbar v_F}{2\omega} \left| j + \frac{1}{2} \right| \dots \dots (3.56)$$

où $j = (1, 2, 3, \dots)$ est un entier. Le nombre de canaux conducteurs (M_{ch}) est de 6 pour un GNR métallique de largeur 16 nm pour $\varepsilon_F = 0,3$ eV. Les expressions pour p.u.l. l'inductance magnétique et la capacité électrostatique sont données par

$$L_m = \frac{\mu \times x}{\omega} \dots \dots (3.57)$$

et

$$C_E = \frac{\varepsilon \times \omega}{x} \dots \dots (3.58)$$

Cependant, l'inductance magnétique et la capacité électrostatique sont modélisées à l'aide du modèle technologique prédictif. L'inductance magnétique et les capacités électrostatiques et de couplage du GNR sont supposés être les mêmes que celle d'un cuivre de dimensions égales.[58]

$$R_Q = \frac{\hbar/2e^2}{M_{ch} M_{layer}} \dots \dots (3.59)$$

VI. Analyses et discussion

Notre analyse sera basée sur la comparaison de l'application du cuivre et des nanotubes de carbones dans les interconnexions :

Afin d'évaluer les avantages potentiels en termes de performance que la distribution aléatoire de la chiralité des CNT à paroi unique SWCNT peut offrir pour les applications d'interconnexion, on appuiera la discussion sur la comparaison de conductivité. Le cuivre a une conductivité plate à ces échelles de longueur puisque sa résistance augmente avec la longueur, ce qui normalise la longueur dans le calcul de conductivité. En revanche, les CNT ont une conductivité linéaire en dessous de leur longueur libre moyenne car la résistance est balistique, et une conductivité constante au-dessus de leur longueur libre moyenne en raison de la résistance diffusive (dépendante de la longueur). Nous pouvons conclure que les CNT, en particulier les nanotubes à paroi multiple MWCNT épais, offrent la plus grande conductivité à des échelles de longueur longues

Les CNT restent attractives, car leur capacitance sera plus petite ou comparable à celle du cuivre grâce à leur taille réduite. Un autre critère important pour les interconnexions est le temps de retard RC. La modélisation de la capacitance du fil pour calculer les délais RC est assez sensible aux hypothèses de modélisation et aux applications spécifiques des circuits avec des différences appréciables dans les modèles qui ont été rapportés.

Il est probable qu'un système hybride ou un alliage de cuivre et de nanotubes offrira une performance suffisante pour les futures interconnexions.

IV. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les applications de chaque nanomatériau pour les interconnexions des circuits intégrés VLSI, nous avons exploré le graphène, les nanotubes de carbones et enfin le cuivre. On a trouvé souvent par estimation expression de leur grandeur tel que la résistance, la capacité et l'inductance que sont les grandeurs majeures en électronique des circuits intégrés. L'objectif aussi est de diminuer les grandeurs dites parasites comme l'effet de peau afin de créer des interconnexions plus performantes.

Chapitre VI Les nanomatériaux et leurs fiabilités dans interconnexions des circuits intégrés

I. Introduction

Dans les années 1960, avec l'émergence des circuits intégrés et de la miniaturisation, il existe un phénomène physique au quels sont confrontés les ingénieurs très répandus dans les circuits intégrés, on parle alors de phénomène d'électromigrations. Ce phénomène devient de plus en plus préoccupant car il compromet fortement la fiabilité des circuits intégrés notamment les circuits VLSI en entraînant de pannes récurrentes dans les circuits ce qui conduirait à une défaillance du circuit intégré.

Il existe aussi un autre phénomène qui compromettes toute aussi bien la fiabilité, il s'agit de du phénomène de la corrosion, évidemment tous les nanomatériaux nous pas tous égaux face a ce dernier certains sont mieux adapte d'autre moins, ce qui va influencer sur le choix des nanomatériaux.

Dans ce chapitre nous allons étudier en profondeurs la fiabilité des nanomatériaux et leurs sensibilité face à ces deux phénomènes, nous allons apporter des solutions afin de réduire l'impacte de ces phénomènes pour assurer un fonctionnement optimal des interconnexions et donc dans les circuits intégrés.

II. L'électromigration

II.1 Description du phénomène d'électromigration

Si on applique une différence de potentiels à une interconnexion, les électrons se déplacent du potentiel le plus faible (la cathode) vers le potentiel le plus fort (l'anode). Les atomes de métaux commencent alors à se déplacer sous l'effet du flux d'électrons qui interagit avec le réseau cristallin. Ce phénomène est appelé échange de quantité de mouvement. Si on suppose que la direction du flux d'électrons est positive, la force induite par le flux d'électron peut être exprimée par :

$$F_{elec} = -q * E = -Z^* e p j \dots\dots\dots (4.0)$$

Où q est la charge atomique effective, Z^* est le numéro atomique effectif, $E = \rho * j$ est la charge de l'électron, E est le champ électrique, ρ est la résistivité du métal et j la densité de courant.

La présence d'imperfections dans le cristal facilite le déplacement des atomes. Les régions de discontinuités dans la structure cristalline (dislocation) ou les interfaces entre les cristaux (joint de grains) sont, par exemple, des zones privilégiées pour la diffusion des atomes de métal. Si une barrière de diffusion comme le tungstène (W) ou le tantale (Ta) bloque une interconnexion, le déplacement des atomes conduit a une contrainte de traction au niveau de la cathode où les atomes au niveau s'accumulent. On aura donc un gradient de stress qui dont l'origine sont deux forces l'une mécanique et l'autre électronique. On donne l'expression de cette force par

$$F_{meca} = \Omega \frac{d\sigma}{dx} \dots\dots\dots (4.1)$$

Où Ω est le volume atomique, σ est le stress mécanique et ρ est la longueur de la ligne.

D'après le modèle de Korhonen, le flux atomique J_a peut être exprimé en fonction de F_{elec} et F_{meca} :

$$J_a = \frac{DC_a}{kT} (F_{elec} + F_{meca}) = \frac{DC_a}{kT} \left(-Z^* e p j + \Omega \frac{d\sigma}{dx} \right) = -\frac{DC_a}{kT} \left(Z^* e p j - \Omega \frac{d\sigma}{dx} \right) \dots\dots\dots (4.2)$$

Où C_a est la concentration atomique, D est la diffusivité atomique, k est la constante de Boltzmann et T est la température.

Pour que le flux des électrons provoque un déplacement de matière $|F_{elec}|$ doit être supérieur à $|F_{meca}|$, comme le montre l'équation 4.2. L'influence de la température est par contre masquée puisque la température est un facteur de l'électromigration contrairement à ce que l'équation pourrait faire penser. En effet, la diffusion est un processus activé thermiquement qui varie exponentiellement avec la température comme le montre l'équation 3.3 [66]

$$(\propto \exp(-A/T)) \dots (4.3)$$

II.2. Les facteurs et mécanismes du phénomène d'électromigration

Dans de nombreuses études et recherches ont été dirigées vers le modèle d'électromigration ainsi que les facteurs qui affectent l'électromigration. Certains des nombreux facteurs connus qui engendrent le phénomène d'électromigration peuvent être classés comme suit

II.2.1 La densité de courant

La densité de courant est le facteur principal qui contribue aux forces de friction ainsi qu'à la divergence du flux. À forte densité de courant, l'échange de quantité de mouvement entre les porteurs de courant et les ions métalliques deviennent considérablement importants, ce qui engendre une très grande force de friction et une divergence de flux le long des lignes de métallisation, entraînant un transport de masse conduisant à la défaillance de la ligne. Il ressort clairement du tableau IV.1 que le temps de défaillance (MTF) diminue à mesure que la densité de courant augmente. Ce résultat a été vérifié par plusieurs travaux de recherche.

II.2.2 L'effet de la température

Les gradients thermiques et la température de la ligne sont deux autres facteurs importants qui induisent l'électromigration. Il a été rapporté que le processus d'électromigration se produit dans le sens allant d'une température élevée à une température basse et que les gradients thermiques sont très importants dans le processus d'électromigration car ils peuvent entraîner une force thermique qui améliore le transport de masse dans les lignes de métallisation. Les gradients thermiques dépendent de la structure de métallisation ainsi que des techniques de mise en œuvre. La température de la ligne est également un facteur clé dans le processus d'électromigration. Selon l'équation (4.4), la MTF diminue avec l'augmentation de la température de la ligne. Cette conclusion peut également être tirée du tableau IV.1. En général, si le système VLSI fonctionne à température ambiante dans des conditions normales, les effets thermiques peuvent être considérés comme insignifiants. [64]

Densité de courant (MA/cm ²)	MTF (h)		
	petite Cristallite	grande Cristallite	Glassed Large Crystallite
0.1	15000	120000	
0.2	4000	30000	
0.4	960	7800	65000
0.6	450	3300	29000
0.8	250	1900	15000
1.0	155	1250	11000
2.0	40	300	2700
4.0	10	75	700
6.0		33	300
8.0		18	

Tableau IV.1 Dépendance du temps moyen jusqu'à défaillance sur la densité de courant pour trois types de conducteurs à film d'aluminium ayant une section transversale de 10⁻⁷ cm² et à une température de 160°C (Dérivé à partir des données de référence [64])

$$MTF = Aj^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \dots (4.4)$$

II.2 Comportement des nanomatériaux et d'électromigration

II.2.1 La fiabilité du cuivre

En raison de sa plus faible résistivité et de ses propriétés d'électromigration potentiellement supérieures, le cuivre est devenu une alternative aux interconnexions en aluminium ou en alliage à base d'aluminium, en particulier pour les technologies de circuits intégrés submicroniques. Les caractéristiques d'électromigration des interconnexions en cuivre avec une épaisseur minimale de métal barrière intercouches ont été étudiées par Tao et al.. Ils ont également comparé les performances des interconnexions en cuivre avec celles réalisées avec Al-4%Cu/TiW et Al-2%Si dans des conditions de contrainte CC, impulsion-CC haute fréquence et courant bipolaire basse fréquence. [64]

II.2.2 Electromigration sous les caractéristiques de courant DC

La figure IV.4 montre les tracés d'Arrhenius de la MTF des interconnexions constituées de Cu, Al-2%Si et Al-4%Cu/TiW plaqués autocatalytiquement par rapport à $1000/T$ sous une densité de courant continu de $1,5 \times 10^7$ A/cm². Ce chiffre montre que la MTF pour les interconnexions de Cu galvanisées est d'environ un et deux ordres de grandeur plus longue que celle de Al-4%Cu/TiW et Interconnexions Al-2%Si, respectivement

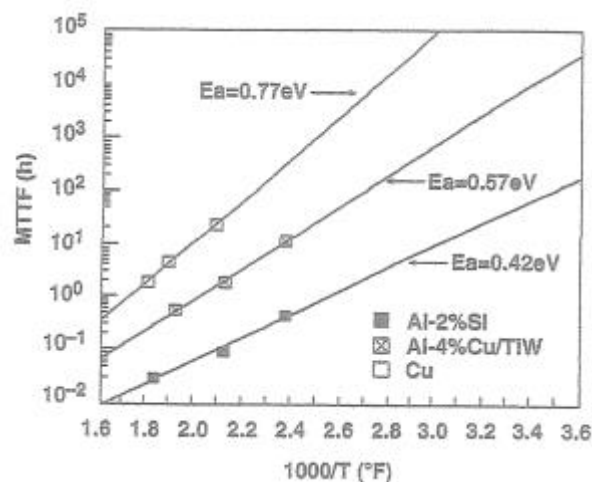


Figure IV.1 Graphiques d'Arrhenius de MTF versus $1000/T$ pour Cu, Al 4 %Cu/TiW et Al-2 %Si interconnexions sous un courant continu de densité = $1,5 \times 10^7$ A/cm²[64]

II.2.3 Electromigration sous les caractéristiques du courant AC bipolaire

Une comparaison de la variation de résistance des interconnexions de Cuivre avec une densité de courant continu de $1,5 \times 10^7$ A/cm² avec celle sous une forme d'onde de courant rectangulaire symétrique bipolaire de 1 MHz avec une densité de courant de $\pm 1,5 \times 10^7$ A/cm² avec une température de 275 °C est présentée dans Figure IV.5. Cette figure montre que dans des conditions CC, l'interconnexion présente une défaillance en circuit ouvert après environ 3,4 heures, alors qu'aucune défaillance n'est détectée dans des conditions AC, même jusqu'à environ 350 heures. Cette figure montre que dans des conditions de courant continu, l'interconnexion présente une défaillance

en circuit ouvert après environ 3,4 heures, alors qu'aucune défaillance n'est détectée dans des conditions de courant alternatif, même jusqu'à environ 350 heures. Des résultats similaires indiquant aucune défaillance dans des conditions AC ont également été présentés pour les interconnexions Al-2%Si et Al-4%Cu/TiW. Cela a été attribué aux effets curatifs des dommages cause par l'électromigration dans les deux moitiés opposées du cycle du courant alternatif.

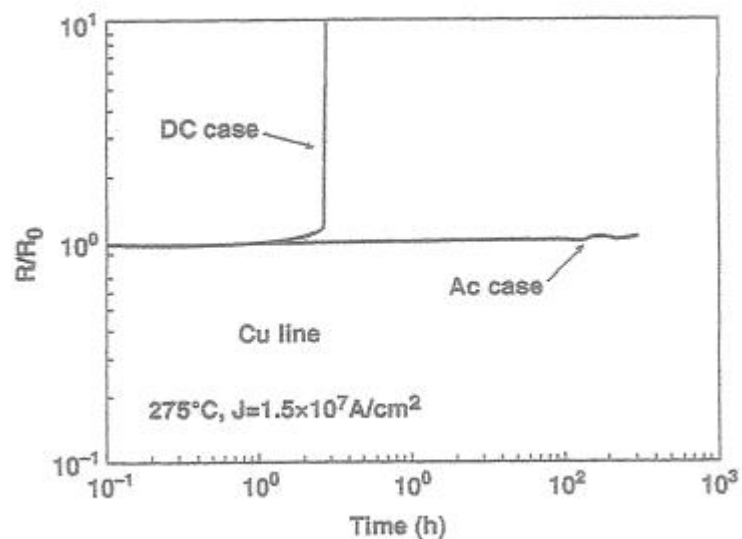


Figure IV.2 : Résistance normalisée pour Cu interconnexions en fonction du temps sous un courant DC densité de $1,5 \times 10^7$ A/cm² et sous un 1 MHz courant bipolaire de densité de courant de crête = $1,5 \times 10^7$ A/cm² à 275°C[64]

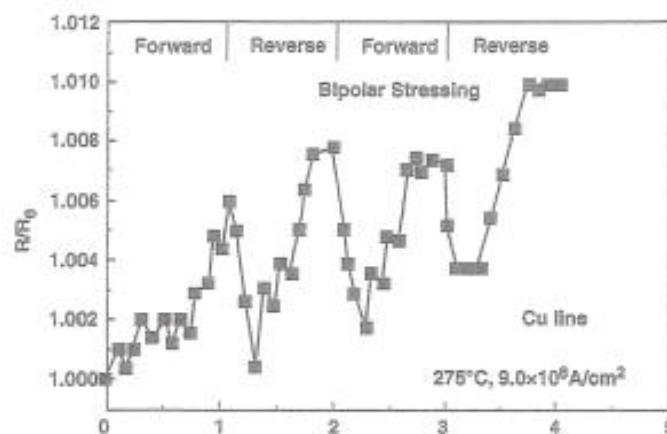


Figure IV.3 : Dépendances de MTF sur fréquence pour Cu, Al-4%Cu/TiW et Al-2%Si interconnexions sous courant DC pulsé avec une densité de courant de pointe = $1,5 \times 10^7$ A/cm² à 275°C.[64]

Cette affirmation a été vérifiée davantage dans des conditions de courant alternatif à basse fréquence. La variation de la résistance en fonction du temps pour les interconnexions à base de cuivre sous une forme d'onde de courant bipolaire avec des densités de courant maximales de $\pm 9,0 \times 10^6$ A/cm² sur une période de près de 2 heures est illustrée à la Figure IV.6. Cette figure montre clairement un comportement de récupération des dommages sous des cycles de courant qui s'opposent, bien qu'elle montre une augmentation globale de la résistance avec les cycles successifs. [64]

II.2.4 Electromigration sous les caractéristiques de courant pulse DC

La figure IV.7 montre les dépendances de la MTF pour les interconnexions à base de cuivre, Al-2%Si et Al-4%Cu/TiW sur la fréquence du courant continu pulsé avec une densité de courant de crête de $1,5 \times 10^7$ A/cm² à 275°. C. Cette figure montre que la MTF des interconnexions en cuivre est d'environ un et deux ordres de grandeur plus longue que celle des interconnexions Al-4 % Cu/TiW et Al-2 % Si, respectivement, pour toutes les fréquences. Les valeurs MTF prédites par le modèle de relaxation des postes vacants sont également incluses dans cette figure et sont représentées par des lignes pleines. Le temps de relaxation des défauts t est un paramètre approprié dans ce modèle et sa valeur peut être d'environ 0,2 ms pour les interconnexions à base de cuivre, d'environ 15 ms pour les interconnexions Al-4%Cu/TiW et d'environ 20 ms pour les interconnexions Al-2%Si interconnexions.

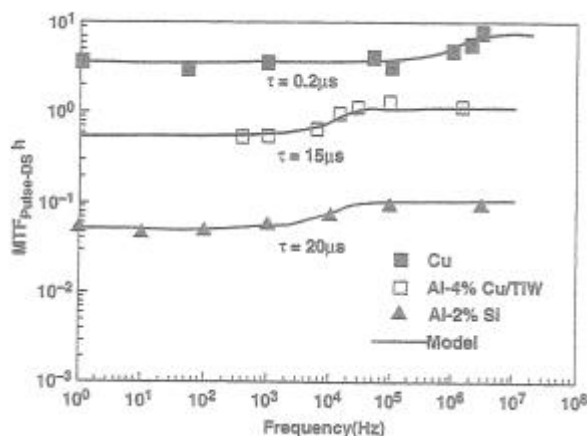


Figure IV.4 Résistance normalisée pour Cu interconnexions en fonction du temps sous basse fréquence courant bipolaire de densité de courant maximale = $9,0 \times 10^6$ A/cm² à 275°C. [64]

II.3. Méthodes pour améliorer la fiabilité EM de l'interconnexion

II.3.1. Interconnexions composite hybride Cuivre-nanotubes de carbones

Dans cette section, nous discutons de l'EM dans le damasquage composite Cu/nanotubes de carbone (CNT) lignes. La structure de test EM comprenait deux niveaux M1-V1-M2. M1, V1 et M2 qui étaient traité par une recette à un seul damasquage. la ligne M1 était une ligne large et courte, et M2 mesurait 2 μm ligne large. Pour la tranche M2 Cu/CNT, le Cu et le CNT ont été remplis dans les tranchées M2 en utilisant une technique de coélectroplacage. Lignes M2 à damasquage unique a base de cuivre et de cuivre/ nanotubes de carbones été passivés avec une couche de a-SiC_xN_yH_z de 30 nm d'épaisseur et recuits à 400 °C avant la tranche Découpage en dés et test EM. Les tests EM ont été effectués dans un gaz ambiant (5 % H₂).

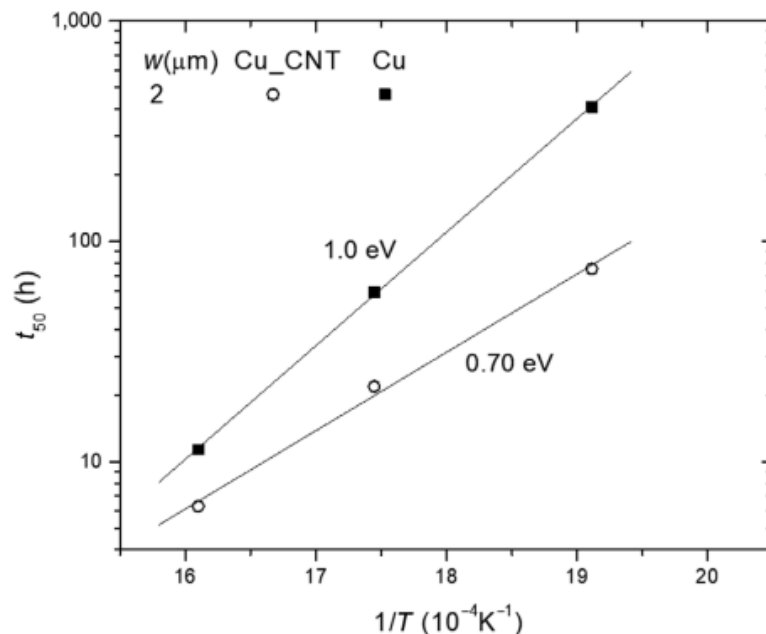


Figure IV.5 Tracé de t_{50} vs $1/T$ pour les lignes composites du cuivre et Cu/CNT de 2 μ m de large[65]

Les durées de vie médianes t_{50} pour le débit massique de cuivre M2 loin du via V1 sont tracées en une fonction de $1/T$ sur la figure III.8, les lignes pleines étant les ajustement moindres carrés. L'activation EM Q_{EM} dans les lignes damasquinées composites Cu et Cu/CNT peuvent être extraits des pentes des lignes et se situent autour de 1,0 eV pour le cuivre pur et de 0,70 eV pour les lignes composites Cu/CNT, respectivement. Ces résultats étaient à l'opposé d'une étude précédente rapportant que la croissance des vides Cu/CNT était réduite et que la durée de vie était amélioré de 100 et $Q_{EM} \approx 2$ eV. Les écarts pourraient être dus à variations dans les structures de test des échantillons composites hybride cuivre NTCs[2]. Les échantillons EM utilisés dans l'étude étaient des lignes de cuivre sans couche de passivation, leurs résultats pourraient donc être influencés par la diffusion superficielle du cuivre libre. [68][65].

De plus, seuls les échantillons d'une seule bande ont été testés et sous une densité de courant extrêmement élevée $j \approx 720 \cdot 10^6$ A/cm² comme par rapport à la structure de test EM typique avec des lignes de cuivre connectées à un blocage limite à l'extrémité de la cathode et $j \approx 0,5$ à $15 \cdot 10^6$ A/cm². Contrairement à la structure de test EM à plusieurs niveaux, la bande unique reliait deux grands réservoirs aux deux extrémités de la ligne, de sorte que la formation de vides ne pourrait pas provoquer une augmentation importante de la ligne R puisque le NTC incorporé dans la ligne de cuivre peut servir de ligne de redondance pour transporter le courant électrique.

Les figures IV.6 a et 6b montrent des images de la MEB descendantes de lignes composites Cu et Cu / CNT de 2 μ m de large respectivement utilisées dans notre étude après la suppression de la couche de passivation a-SiC_xNyHz par sonde ionique focalise. Une grande structure similaire a la structure du bambou a été observée dans la lignée a base de cuivre pur, tandis que de petites structures de grains de cuivre polycristallins ont été observées dans la lignée composite cuivre nanotubes de

carbones. Les résultats du Q_{EM} de 1,0 eV et 0,7 eV pour le Cu pur et Cu/CNT les échantillons, respectivement, peuvent être expliqués par les deux microstructures distinctes. Dans le pur cas de la ligne de type bambou, la migration des atomes de cuivre le long de L'interface contrôlait le débit massique induit par l'EM avec une énergie d'activation de 1 eV.

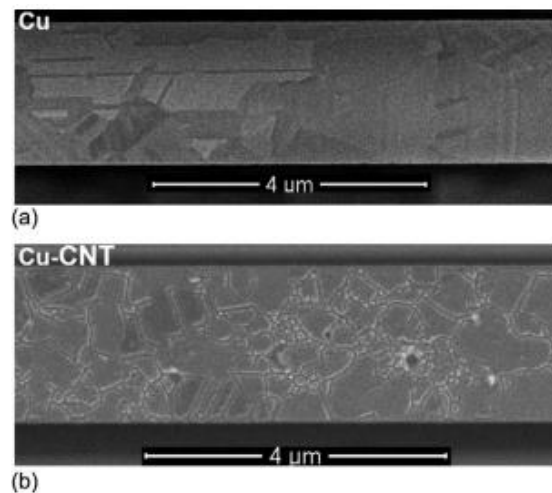


Figure IV.6 Images SEM descendantes avec retrait du convecrle a-SiC_xN_yH_z par SIF : (a) Cu et (b) Ligne composite Cu/CNT, respectivement. [65]

En revanche, pour la gamme hybride Cu/CNT, les nanotubes de carbones ont inhibé la croissance des grains dans le cuivre électrolytique, ce qui donne une structure polycristalline. En conséquence, les transports de masse étaient dominés par la diffusion le long des grains joints de grains du cuivre, produisant une énergie d'activation de 0,7 eV. Les caractéristiques des vides dans les lignées cuivre pur et Cu/CNT ont été examinées comme indiqué dans Figure IV.10, où la figure IV.10a et les figures IV.10b et c sont les images MEB descendantes de lignes testées EM pour le cuivre pur et Cu/CNT, respectivement, et la figure IV.10d est un TEM image de coupe le long de la ligne composite M2 Cu/CNT. Ici typique induit par EM des vides ont été trouvés près de l'extrémité cathodique des lignes de test, comme le montrent les Figures IV.47a et b, où de nombreux vides se sont formés avec des buttes dans la ligne Cu/CNT, comme le montre la Figure IV.10c, puis les buttes ont été extrudées et ont bouclé la passivation Couche a-SiC_xN_yH_z, comme le montre la figure IV.10d [65]

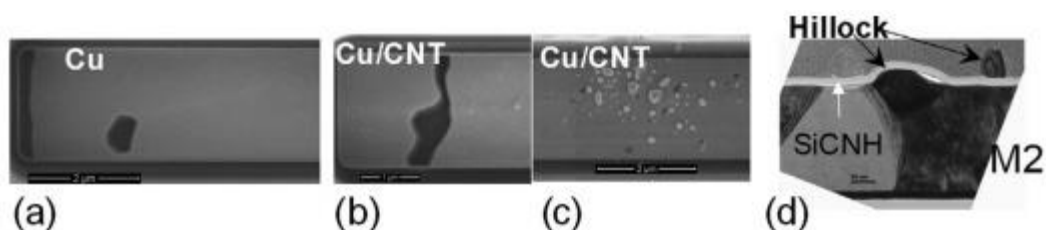


Figure IV. 7 Images de MEB descendantes le long de l'extrémité cathodique de l'EM M2lignes testées : (a) lignes composites de Cuivre pur ; (b) et (c) Lignes composites Cu/CNT. (d) Coupe d'image TEM le long de la ligne composite Cu/CNT. [65]

II.3.2. Revêtement du substrat

Le revêtement du substrat a pour but d'éviter la création des places vacantes essentielles à la diffusion et ainsi pour compléter les places vacantes des liaisons rompues à la surface du métal. On appelle ceci la passivation ». Après avoir ajouté une couche de passivation, la chaleur engendrée par l'effet joule peut être dissipée plus facilement. Afin de former une couche de passivation, le substrat est essentiellement scellé hermétiquement par le revêtement en couche. Les matériaux les plus utilisés sont des oxydes tel que SiO et des oxydes anodiques et des couches diélectriques comme Al₂O₃-SiO₂ et P₂O₅-SiO₂. Cette technique s'est avéré efficace pour améliorer la durée de vie de l'électromigration. Il a en outre été montré que l'augmentation de l'épaisseur de ces couches augmente la durée de vie de l'électromigration tant que l'épaisseur ne change pas dépasser 6, 000 Å°. [64]

II.3.3. Interconnexions multicouches encapsulées

L'encapsulation s'avère utile pour d'éviter la formation de buttes, Il été démontré que cette approche améliorer les durées de vie d'électromigration. Il peut être réalisé en utilisant des métaux réfractaires et une technologie d'espacement. Le métal réfractaire est déposé par pulvérisation cathodique polarisée et par gravure anisotrope du matériau. Plusieurs couches de métaux réfractaires sont déposées pour garantir la fiabilité. Il existe aussi une manière de réaliser l'encapsulation, cette manière consiste à former une couche d'oxyde natif sur l'interconnexion. Pour être efficace, l'oxyde natif doit être suffisamment épais par rapport à l'épaisseur du film pour assurer l'élimination des buttes. [64]

II.3.4. Mise en place d'une couche mince en Or

Il a été démontré que les interconnexions à base d'or sous forme de couche mince sont d'une meilleurs MTF que les couches minces en aluminium, cela est principalement due à une forte énergie d'activation. En effet, les interconnexions en or ont montré un de meilleures performances. En particulier, à des densités de courant élevées et des opérations à des températures élevées. Généralement, l'or peut être déposé en employant des techniques d'évaporation sous vide. Or, en raison de sa nature inerte, l'adhésion de l'or à la couche isolante par liaison chimique s'avère extrêmement complexe. [64]

II.3.5. Techniques de dépôt

Il a été démontré que la MTF d'un système VLSI a une relation étroite avec la technique de dépôt employée. Par exemple, il On constate que la MTF est plus petite pour la technique du film pulvérisé que pour la technique du faisceau électronique. Une explication possible pourrait être différente les techniques de dépôt peuvent modifier la structure des défauts d'une métallisation et cela peut changer le modèle d'électromigration. [64]

III. La corrosion

III.1 Description

Il Des discussions fondamentales au sujet de la corrosion ont été rapporte dans de nombreuses sources [69] [70] . Les discussions ici se limiteront donc à la corrosion des couches minces utilisées en microélectronique. et leur caractérisation. La corrosion dans les câbles en couches minces peut être décrite comme la perte (involontaire) de métal conducteur par dissolution dans un électrolyte ou conversion en une forme non conductrice en réponse à une contrainte externe, qui est principalement de nature chimique ou électrochimique. La contrainte externe est généralement constituée d'un combinaison des éléments suivants on peut citer :

1. Stress mécanique
2. Impuretés externes
3. Temperature
4. Voltage

Les réactions de corrosion nécessitent la génération d'une cellule électrolytique comportant deux électrodes et un électrolyte. Nous sommes plus familiers avec les électrolytes aqueux, mais à peu près n'importe quel matériau qui peut supporter la diffusion des ions peut servir d'électrolyte. Un métal en équilibre avec son les ions dans un électrolyte (demi-cellule) peuvent être écrits comme une réaction, avec une énergie libre caractéristique réaction et un potentiel électrique correspondant. Potentiels de cellules de corrosion (forces électromotrices) de nombreux métaux ont été mesurés par rapport à une demi-pile à hydrogène (potentiel de référence de 0,0 V), et la liste des valeurs est connue sous le nom de série galvanique. Les réactions des cellules de corrosion sont largement classé comme :

1. Galvanique, où des éléments avec des forces électromotrices différentes forment une cellule
2. Concentration, où la concentration ionique locale différentielle crée des sites de potentiels différents.

Les électrodes ou les métaux avec de grandes valeurs positives sont généralement actifs dans une réaction corrosive (anodiques), alors que ceux qui ont des champs électromagnétiques négatifs ont tendance à être passifs (cathodiques). Cependant, la cinétique de corrosion, même dans une cellule de corrosion simple, peut être modifiée par passivité, c'est-à-dire lorsque l'élément forme une couche superficielle passive, ou par polarisation lorsque la concentration ionique locale adjacente à l'électrode est changée. La métallisation en couches minces utilisée en interconnexion souffre de la présence de tous les mécanismes ci-dessus contribuant à la formation d'alvéoles de corrosion et à la corrosion. Pour Par exemple, la susceptibilité à la corrosion des conducteurs à couches minces est influencée par le choix du métal (passivation, potentiel galvanique) ; la présence de jonctions métallurgiques différentes causées par des couches ou phases, et inhomogénéités de composition ; la présence d'électrolytes en contact avec le film surface sont nécessaires à l'apparition et à la poursuite de la corrosion.

La corrosion des films minces peut être provoquée pendant le traitement et entre les étapes du processus lorsque des résidus les impuretés peuvent réagir avec la surface des films : c'est ce qu'on appelle la corrosion en cours de processus. Corrosion en cours de processus peut entraîner des pertes de rendement ou provoquer des pannes de fiabilité prématurées. Lorsqu'un appareil fonctionnel à la fin de tous les cycles de traitement échoue lors de l'utilisation ou du stockage en raison de la corrosion d'une interconnexion, alors il devient un défaut de fiabilité.

III.2 Mesures de fiabilité, de la température et d'humidité

Les couches minces utilisées dans les interconnexions sont généralement étudiées soit grâce à une structure peigne-serpentin, une structure en double labyrinthe de lignes méandres parallèles (Figure III.7b), des structures en labyrinthe séparées par une couche isolante (Figure III.7c) ou des structures en labyrinthe séparées par une couche isolante (Figure III.7c). Ces lignes de labyrinthe séparées par une couche isolante (Figure III.7c). Les lignes de labyrinthe peuvent être construites selon les mêmes règles de conception du circuit en utilisant des processus et des structures similaires. De plus, les lignes adjacentes peuvent être polarisées électriquement les unes par rapport aux autres. La structure est généralement déterminée grâce à un plot de liaison montée sur un substrat. La liaison par fil ou d'autres techniques sont utilisées pour réaliser les connexions électriques entre le substrat et le plot de connexion. La puce de test est généralement encapsulée dans un matériau organique ou inorganique et les structures de test sur la puce sont polarisées électriquement, tandis que la puce est soumise à une température et une humidité élevées (THV). Le courant de fuite entre lignes adjacentes (courant de corrosion) est parfois surveillé et, alternativement, le test est interrompu périodiquement et la résistivité des lignes corrosives est mesurée. Le courant de fuite est une mesure de la vitesse de réaction de corrosion tandis que la variation de la résistivité est une mesure indirecte de l'étendue de la corrosion. L'échantillon d'essai est examiné à l'aide d'outils analytiques pour déterminer les produits corrosifs ainsi que l'étendue et l'emplacement de la corrosion. L'échantillon d'essai est examiné à l'aide d'outils analytiques pour déterminer les produits corrosifs ainsi que l'étendue et l'emplacement de la corrosion. Les tests de température et d'humidité sont généralement effectués sur des puces emballées et sont conçus pour tester l'intégrité du joint hermétique afin d'empêcher la diffusion de l'humidité et donc la corrosion des interconnexions. Les conditions de test les plus largement utilisées sont 85 °C, 85 % d'humidité relative, avec une polarisation en tension.

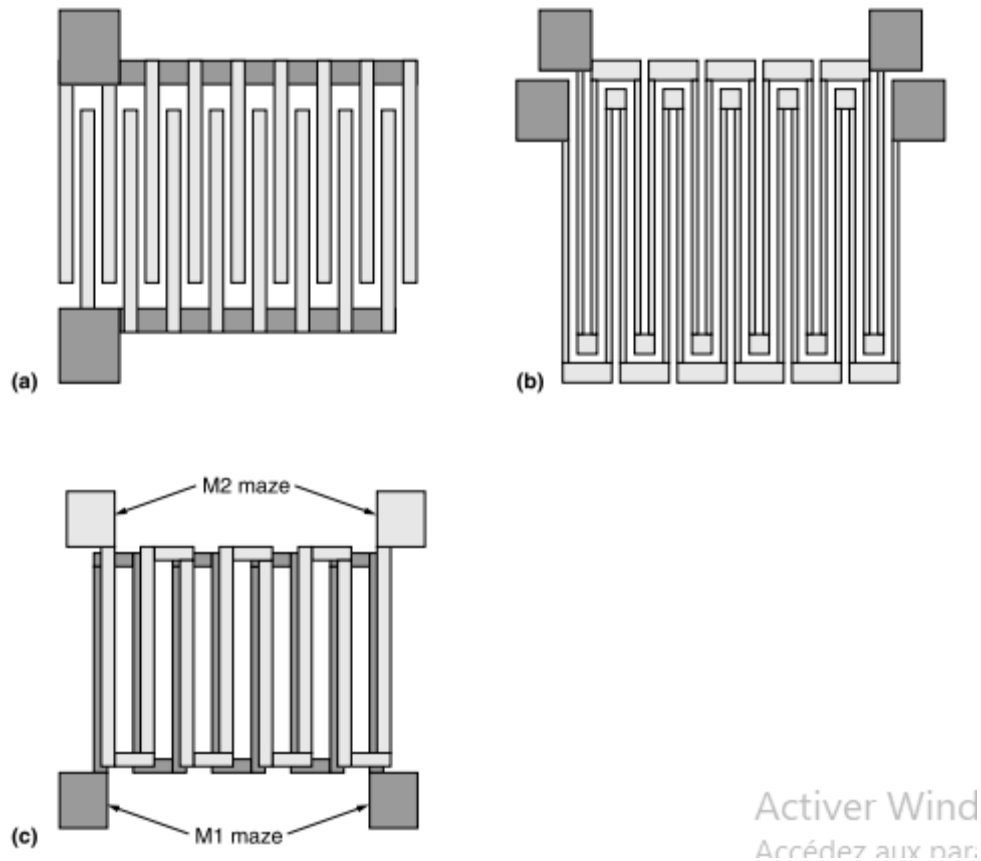


Figure IV.8 Schéma de la vue de dessus des structures utilisées dans les études de corrosion THV. [65]

III.3 Etude de la corrosion des conducteurs Aluminium Cuivre

Malgré l'émergence de la technologie des interconnexions à base de cuivre, les nanomatériaux conducteur les plus répandus dans les interconnexions restent à base d'aluminium. Souvent, cet aluminium est utilisé comme alliage avec le cuivre et le silicium pour former des couches minces de Ti, TiN ou TiW. Dans le contexte des multiveaux d'interconnexion, même en l'absence de tensions imposées de l'extérieur, les lignes sont connectées aux régions de silicium présentant différentes impuretés et conductivités qui les exposent à la corrosion.

L'étude a révélé que la sensibilité à la corrosion a augmenté lorsque la teneur en cuivre est augmentée entre 1 et 2 %. L'ajout de 1 % de Si à Al-2 % de Cu a permis de prolonger le délai d'apparition de la corrosion, ce qui est cohérent avec l'amélioration de la formation d'oxyde natif protégeant le film. Dans l'étude [70], on a également observé que l'ajout de Si à Al-2 % réduit la corrosion. Cette étude a également attribué la corrosion superficielle localisée à l'action galvanique due à la présence de particules de phase θ [71]. On a fait des études sur la corrosion de la métallisation d'Al dans des circuits intégrés encapsulés dans du plastique et a conclu qu'un film d'eau absorbé à une humidité

relative élevée conduisait à la passivation ou à la corrosion destructrice selon les impuretés ioniques présentes. [72]

III.4 Prévention de la corrosion

Afin de prévenir la corrosion dans les interconnexions des circuits intégrés de manière efficace, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre :

- **Revêtements protecteurs** : L'application de revêtements sur les surfaces exposées peut aider à prévenir la corrosion en isolant les métaux de l'environnement extérieur.
- **Le Choix du matériau adapté** : L'utilisation de métaux plus résistants à la corrosion, comme l'or ou des alliages spécifiques, peut également réduire le risque de défaillance
- **Contrôle de l'environnement** : Maintenir un environnement contrôlé, avec une faible humidité et des contaminants, afin de pour prolonger la durée de vie des circuits intégrés

III.5 les nanomatériaux et interconnexion dans les circuits intégrés

Les nanomatériaux offrent des solutions prometteuses pour relever les défis des interconnexions dans les circuits intégrés actuels. Les nanomatériaux, comme les nanotubes de carbone et les nanorubans de graphène, présentent des propriétés électriques, thermiques et mécaniques exceptionnelles qu'on a vu dans le chapitre 1. ces propriétés sont principalement

- Une conductivité électrique élevée permettant un transport rapide des courants
- Une résistance mécanique pour supporter les contraintes mécaniques
- Une dissipation thermique efficace réduisant les problèmes de surchauffe

L'utilisation des CNT et GNR pour ces niveaux d'interconnexions présente de nombreux avantages par rapport au cuivre :

- Meilleures performances avec des délais de propagation réduits
- Densité d'intégration plus élevée grâce à la miniaturisation
- Meilleure fiabilité et durabilité des circuits intégrés

Toutefois, l'intégration des CNT et GNR comporte aussi des défis technologiques à relever dans le future.

- Maîtrise des procédés de fabrication à l'échelle nanométrique
- Gestion des défauts et de la fiabilité des interconnexions nanostructurées
- Développement de modèles et d'outils de conception adaptés

Malgré ces défis, les interconnexions à base de CNT et GNR représentent une voie prometteuse pour repousser les limites des interconnexions dans les futurs circuits intégrés ultra-denses et performants.

Les nanomatériaux peuvent aussi être utilisés pour lutter contre la corrosion dans les interconnexions dans les circuits intègres. Il existe plusieurs types de nanomatériaux utilisés à cet effet

Nanoparticules métalliques : Des nanoparticules de métaux tel que l'argent ou le zinc sont souvent incorporées dans des revêtements afin de réduire la corrosion.

Oxydes métalliques : Les oxydes de titane ou de zinc, à titre d'exemple, sont utilisés pour créer des barrières protectrices qui empêchent l'humidité et les agents corrosifs d'atteindre les surfaces métalliques sous-jacentes.

Nanocomposites polymères : L'ajout de nanoparticules à des matrices polymères peut renforcer les propriétés mécaniques et la durabilité des revêtements, tout en offrant une protection contre la corrosion à la fois.

Mécanismes de protection

Les nanomatériaux agissent principalement par :

- **Formation de barrières** : Ils créent des couches protectrices qui limitent l'accès des agents corrosifs aux surfaces métalliques.
- **Inhibition des réactions électrochimiques** : Les nanomatériaux peuvent interférer avec les réactions qui provoquent la corrosion, ralentissant ainsi le processus.
- **Amélioration de l'hydrophobicité** : Certains revêtements nanostructures peuvent rendre les surfaces superhydrophobes, ce qui réduit l'adhésion de l'eau et des contaminants. [73-77]

VI. Analyses et discussion :

Bien qu'il est évident de constater que le cuivre est matériaux privilégié dans les interconnexions en raison de sa conductivité électrique très optimale par rapport autre matériaux, il reste néanmoins certaine déconvenue car en réduisant la tailles des interconnexions, le cuivre est exposée au phénomène majeur dans les circuits intégrés qu'est electromigration, ce phénomène auquel il faut analyser et traiter ou bien trouver des alternatives fiables, efficaces et faciles à mettre en œuvre.

Il s agit d'opter pour les nanotubes de carbones, car leur structure d'atome de carbone C - C forme une forte liaison covalente offre une densité de courant très élevé ainsi un libre parcours moyen long.

De même que le problème de corrosion est vite résolu en utilisant les nanotubes de carbones, car les liaisons de carbones sont les plus fortes liaisons covalentes qui existe, d'où l'origine de la solidité du diamant.

V. Conclusion

Nous avons exploré donc dans ce chapitre, la fiabilité des nanomatériaux et mais aussi l'ampleur des deux phénomènes qui perturbent le fonctionnement normal des circuits intégrés vis-à-vis aux interconnexions. bien qu'il en existe d'autres, il est bien plus préférable d'aborder ces deux phénomènes avec une approche multidisciplinaire car ils impliquent de large domaines, on a aussi constaté que différents type de nanomatériaux que ce soit le cuivre , aluminium ou bien Cuivre et CNT hybride ont une influence plus ou moins grande par rapport à ces phénomènes, ce qui va jouer sur la possibilité d'être de bon candidats. Malgré l'efficacité des nanotubes de carbones, son prix ainsi que son élaboration ainsi que sa toxicité sont un frein majeur à son emploi en microélectronique. Jusqu'à aujourd'hui, plusieurs recherches à travers le monde sont

menées pour pouvoir répondre à des cahiers des charges de plus en plus exigeants afin de garantir une bonne fiabilité tout en gardant un bon rapport qualité /prix.

Conclusion général

Conclusion général :

En conclusion, ce mémoire a permis d'explorer en profondeur de l'impact des nanomatériaux sur les interconnexions des circuits intégrés et le rôle joué par ces derniers à repousser les limites de la technologie nano traditionnelle à travers l'analyse des propriétés uniques des nanomatériaux, nous avons mis en lumière leur potentiel à surmonter les défis actuels liés à la miniaturisation et à l'efficacité énergétique des dispositifs électroniques. Les résultats obtenus montrent que l'intégration de nanomatériaux, tels que les nanotubes de carbone et les nanofils métalliques, peut significativement améliorer la conductivité, la résistance à la chaleur et la durabilité des interconnexions.

De plus, ces matériaux offrent des solutions innovantes pour réduire l'effet de la résistance et de la capacitance, deux facteurs critiques dans la performance des circuits intégrés modernes. En outre, les perspectives d'avenir dans ce domaine sont prometteuses. Les recherches en cours sur les nanomatériaux ouvrent la voie à des applications révolutionnaires dans l'électronique, notamment dans le développement de circuits intégrés plus rapides et plus efficaces.

Dans les circuits VLSI, la notion de fiabilité occupe une place prépondérante, c'est pourquoi bon nombre de programmes de recherche s'orientent sur ce sujet, ainsi beaucoup d'ouvrages illustrent cela. Trouver un nanomatériau qui résiste à certains phénomènes comme la corrosion et l'électromigration, à travers cela, s'illustre l'utilité des matériaux en carbone comme les nanotubes grâce à certaines de ses caractéristiques qu'on a évoquées.

En somme, l'étude des nanomatériaux pour les interconnexions des circuits intégrés représente une avancée significative dans le domaine de l'électronique, avec des implications qui pourraient transformer notre approche de la conception et de la fabrication des dispositifs électroniques dans les années à venir.

Références bibliographiques

Références Bibliographique

- [1] Kroto, H. W., Curl, R. F., & Smalley, R. E. - The discovery of fullerenes. Nobel Prize in Chemistry 1996. NobelPrize.org
- [2] Costa, P. (2001). Nanosystèmes Nanomatériaux - Propriétés et applications. Techniques de l'ingénieur.
- [3] Roco, M.C., & Bainbridge, W. (2001). Les nanomatériaux, au cœur de la nanotechnologie. Dans ce document, les auteurs abordent les généralités sur les nanoparticules, y compris leur classification et leurs propriétés fondamentales.
- [4] Kohler, A., & Fritzsche, W. (2004). Les nanoparticules : définitions et propriétés. Ce rapport traite des dimensions géométriques des nanostructures et des effets quantiques qui influencent leurs propriétés.
- [5] Moreno, M. Synthèse en phase gazeuse de nanoparticules de carbone par plasma hors équilibre. Thèse de doctorat, École des mines de Paris. Ce travail explore la synthèse et les propriétés des nanotubes de carbone, en les plaçant dans le contexte des nanostructures.
- [6] Techniques de l'Ingénieur. Cet article présente une analyse détaillée des propriétés mécaniques des nanotubes de carbone et leur utilisation dans les matériaux composites, mettant en avant leur potentiel en ingénierie.
- [7] PCC Group Product. (n.d.). Le graphène, qu'est-ce que c'est et à quoi sert-il. Cet article présente les caractéristiques du graphène et ses applications dans l'électronique, le stockage d'énergie et la biomédecine, ainsi que son importance dans le développement de nouvelles technologies.
- [8] Khaled, A., & Bouzid, H. (2020). Synthèse et caractérisation de nanoparticules de cuivre pour des applications photovoltaïques. Université de Tlemcen. Ce document aborde la synthèse des nanoparticules de cuivre, leurs propriétés électriques et thermiques, ainsi que leur utilisation potentielle dans les technologies électroniques, y compris les circuits intégrés
- [9] Ghaffari, A. (2007). SYNTHÈSE ET CARACTÉRISATION DE NANOFILS DE SILICIUM. Thèse de doctorat, Université Lille 1. Cette recherche couvre la synthèse des nano fils de silicium par diverses méthodes, y compris la méthode VLS, ainsi que leurs propriétés électroniques et optiques.
- [10] Loukil, R. (2010). Les nanofils de cuivre pourraient doper l'électronique. Usine Nouvelle. Cet article discute des propriétés électroniques des nanofils de cuivre et de leur potentiel en tant qu'alternative aux électrodes transparentes traditionnelles comme l'ITO, en mettant en avant leur flexibilité et leur coût réduit.
- [11] Nanofil - Wikipédia. Cet article fournit une vue d'ensemble des nanofils, y compris leurs dimensions, structures et applications potentielles dans l'électronique, ainsi que des informations sur leur utilisation dans des dispositifs flexibles.
- [12] FasterCapital. Le rôle du cuivre dans la fabrication électronique. Ce document traite de l'importance du cuivre dans l'électronique moderne, en mettant l'accent sur les nano fils de cuivre et leurs propriétés uniques qui les rendent adaptés pour remplacer des matériaux coûteux et rares comme l'indium .
- [13] Serre, P. (2014). Etude des propriétés structurales et électriques de réseaux aléatoires de nano fils de silicium. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes. Ce travail se concentre sur les propriétés des nano fils

de silicium et leur application dans la détection biologique, offrant une vue d'ensemble des méthodes de synthèse et des caractéristiques des nanostructures.

[14] Bencik, M. (2016). Etude et élaboration de nano fils de silicium par voie chimique pour supercondensateurs. Thèse de doctorat, Université Boumerdes. Cette recherche aborde la fabrication de nanofils de silicium pour des applications en stockage d'énergie, mettant en avant leurs propriétés électrochimiques et leur potentiel pour les supercondensateurs.

[15] Boukherroub, R. (2010). Nano fils de silicium pour analyse sensible. Thèse de doctorat, Université Lille. Cette thèse traite des méthodes de fabrication des nano fils de silicium par gravure chimique et examine leurs propriétés électriques et leur utilisation dans des capteurs sensibles.

[16] Etude des propriétés électro-thermo-mécaniques des nano fils de silicium. Thèse de doctorat, HAL Thèses. Ce document présente une étude approfondie sur les propriétés multiphysiques des nano fils de silicium, y compris leur conductivité thermique et électrique, ainsi que leurs applications potentielles dans les systèmes électromécaniques.

[17] Iijima, S. (1991). "Helical microtubules of graphitic carbon." *Nature*, 354(6348), 56-58. DOI: 10.1038/354056a0.

[18] Smalley, R. E., et al. (1996). "The synthesis of carbon nanotubes by laser ablation." *Chemical Physics Letters*, 260(1-2), 1-6. DOI: 10.1016/0009-2614(96)00494-5.

[19] Canal U. (n.d.). Les nanotubes et leurs applications. Cette conférence présente l'état actuel des recherches sur les nanotubes de carbone, leurs propriétés uniques et leurs applications potentielles dans divers domaines technologiques

[20] Techniques de l'Ingénieur. (n.d.). Dioxyde de titane - Propriétés et applications. Ce dossier complet décrit les différentes applications du dioxyde de titane, y compris ses propriétés photocatalytiques et son utilisation dans divers matériaux.

[21] Wikipedia. (n.d.). Dioxyde de titane. Cet article fournit une vue d'ensemble sur le dioxyde de titane, ses formes cristallines, ses propriétés et ses applications variées dans différents secteurs industriels.

[22] INRS. (n.d.). Nanotubes de carbone. Ce document présente la structure des nanotubes de carbone, leurs propriétés mécaniques et électriques, ainsi que leurs applications dans divers domaines industriels.

[23] Canal U. (n.d.). Les nanotubes et leurs applications. Cette conférence aborde la structure, la synthèse et les propriétés des nanotubes de carbone, ainsi que leurs applications potentielles dans différents secteurs.

[24] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A. (2004). "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films." *Science*, 306(5696), 666-669. DOI: 10.1126/science.1102896.

[25] J. A. Robinson, et al. (2011). "Growth of Large-Area, Single-Layer Graphene by CVD on Copper." *Nano Letters*, 11(2), 204-210. DOI: 10.1021/nl103270d.

[26] Ciochoń, P., Marzec, M., Olszowska, N., & Kołodziej, J. (2020). "Reversible graphitization of SiC: A route towards high-quality graphene on a minimally step bunched substrate." *Journal of Materials Science*, 55(10), 4128-4139.

[27] Université de Lille (2007). "SYNTHÈSE ET CARACTÉRISATION DE NANOFILS DE SILICIUM." Thèse. Disponible à l'adresse : PDF. Ce document présente plusieurs méthodes de synthèse, y compris la méthode VLS et d'autres techniques comme l'évaporation physique.

[28] Université de Tlemcen. "Chapitre II: Les Différentes Méthodes de Nano structuration du Silicium." PDF. Ce chapitre traite des méthodes de croissance des nanofils de silicium, y compris les défis liés à l'utilisation de différents métaux comme catalyseurs.

[29] Minatec (2010). "Synthèse de nanofils." Article disponible sur Minatec.org. Cet article discute des avancées dans la synthèse des nanofils de silicium par CVD à basse température, compatible avec la technologie CMOS.

[30] Université d'Angers (2011). "Thèse sur les méthodes de synthèse des nanofils." PDF. Cette thèse aborde diverses techniques de synthèse, y compris le remplissage des nanotubes et les méthodes catalytiques.

[31] Knoll, M., & Ruska, E. (1986). The invention of the electron microscope. Nobel Prize in Physics.

[32] Williams, D. S., & Carter, C. B. (1996). *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. Plenum Press.

[33] Williams, D. B., & Carter, C. B. (1996). *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. Plenum Press.

[34] Nanoscience Instruments. (n.d.). *Transmission Electron Microscopy*. Nanoscience Instruments.

[35] Wikipedia. (n.d.). *Microscopie électronique en transmission*. Wikipedia.

Cet article fournit une description détaillée du MET, y compris ses avantages, limitations et applications.

[36] Futura Sciences. (n.d.). "Microscope électronique a balayage - MBE." Futura Sciences

[37] wikipedia .équipement MET

[38] wikipedia avantages et limites MBE

[39] Futura Sciences. (n.d.). "Microscope électronique en transmission - MET." Futura Sciences.

[40] SC3M Université de Nantes. (n.d.). "Microscopie électronique à transmission." SC3M.

Les microscopes électroniques à transmission sont coûteux à l'achat et à l'entretien, nécessitant un personnel qualifié pour leur utilisation.

[42] Wikipedia. (n.d.). "Microscope à force atomique." Wikipedia.

Cet article offre une description générale de l'AFM, y compris ses principes de fonctionnement et ses composants.

[43] Nanosurf. (n.d.). "How does an AFM work?" Nanosurf.

Cette ressource explique le fonctionnement détaillé de l'AFM et ses applications dans la recherche scientifique.

[44] Sokolov, I., & Mendez, J. (2014). "Atomic Force Microscopy: A Powerful Tool for Characterizing Nanomaterials." *Nanotechnology Reviews*, 3(1), 1-20.

Cet article explore comment l'AFM est utilisé pour caractériser les propriétés des nanomatériaux.

[45]] Van der Pauw, L. J. (1958). "A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbitrary Shape." *Philips Research Reports*, 13, 1-9.

Cet article classique introduit la méthode de quatre pointes pour mesurer la résistivité électrique des matériaux.

[46] HTDS. (n.d.). "Analyseurs et spectromètres d'impédance." HTDS.

Cette page fournit des informations sur les équipements utilisés pour la spectroscopie d'impédance et leurs applications.

[48]]Barsoukov, E., & Macdonald, J. R. (2005). *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. Wiley-Interscience.

Cet ouvrage couvre les principes théoriques et expérimentaux de la spectroscopie d'impédance, ainsi que ses applications dans l'analyse des matériaux

[49] Macdonald, J. R., & Barsoukov, E. (2000). "Impedance Spectroscopy: A Review." *Journal of the Electrochemical Society*, 147(2), 1-12.

Cet article examine les principes et les applications de la spectroscopie d'impédance dans divers domaines scientifiques.

[50] Mayadas, A.F. and M. Shatzkes. "Electrical-Resistivity Model for Polycrystalline Films: The Case of Arbitrary Reflection at External Surfaces." *Physical Review B* 1 (1970)

[51] Ruehli, Albert E. and Pierce A. Brennan. "Efficient Capacitance Calculations For Threedimensional Multiconductor Systems." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* MTT-21, no. 2, (Feb. 1973): 76–82.

[52] Yuan C. and Timothy N. Trick. "A Simple Formula for the Estimation of the Capacitance of Two-Dimensional Interconnects in VLSI Circuits." *IEEE Electron Device Letters* EDL-3, (Dec. 1982): 391–393.

[53] Barke, Erich. "Line-to-Ground Capacitance Calculation for VLSI: A Comparison." *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* 7, no. 2 (1988): 295–298.

[54] Kaustav, Banerjee and Amit Mehrotra. "Inductance Aware Interconnect Scaling." In *Proceedings of International Symposium on IEEE Quality Electronic Design*, (2002).

[55] Kamon Mattan, Michael J. Tsuk, and Jacob K. White. "FASTHENRY: A Multipole Accelerated 3-D Inductance Extraction Program." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42, no. 9, (Sep. 1994): 1750–1758.

- [56]Nieuwoudt, Arthur and Yehia Massoud. "Understanding the Impact of Inductance in Carbon Nanotube Bundles for VLSI Interconnect Using Scalable Modeling Techniques." IEEE Transactions on Nanotechnology 5, no. 6 (2006): 758–765.
- [57]Afreen Khursheed , Kavita Khare, NANO INTERCONNECTS Device Physics, Modeling and Simulation,CRC Press, 2022
- [58]Debaprasad Das, HafizurRahaman, Carbon Nanotube and Graphene Nanoribbon Interconnects, Press Taylor & Francis Group, 2015.
- [59]Anna Triantafyllou, "Étude, réalisation et caractérisation d'interconnexions radiofréquences dans les circuits intégrés", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [60]Gérard Poupon, "Packaging des circuits intégrés : Supports d'interconnexion", Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique, 2004.
- [61]"Circuit intégré", Wikipédia, l'encyclopédie libre.
- [62] Florian Gagnet, "Contribution à l'étude d'interconnexions en circuits intégrés", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1998.
- [63]Sondheimer Ernest Helmut. "The Mean Free Path of Electrons in Metals." Advances inPhysics 1, no. 1 (1952): 1–2
- [64] Ashok K. Goel, A One-Semester Course in Modeling of VLSI Interconnections, Momentum Press, 2015
- [65] Paul S. Ho, Martin Gall,Chao-Kun Hu, ValeriySukharev,Electromigration in Metals Cambridge University Press, 2022
- [66]<https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectromigration#:~:text=Basiquement%2C%20on%20peut%20d%C3%A9finir%20l,de%20courant%20comme%20en%20micro%C3%A9lectronique.>
- [67] C. Subramaniam, T. Yamada, K. Kazufumi, et al., One-hundred-fold increase in current carrying capacity in a carbon nanotube-copper composite, Nature Communication 4 (2013), Article no 2202
- [68] Uhlig, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley, New York, 1966.
- [69] Evans, U.R., The Corrosion and Oxidation of Metals: Scientific Principles and Practical Applications, Edward Arnold, London, 1960.
- [70] Weston, D., S.R. Wilson, and M. Kottke, J. Vac. Sci. Technol., A8, 2025, 1990.
- [71] Koelmans, H., IEEE Reliability Physics, 1974, p. 168.
- [72] Geraldine C. SchwartzKris, V. Srikrishnan, Handbook of Semiconductor Interconnection Technology, CRC Press, 2006.
- [73] Chilo, J. &Angenieux, G. (1987). Interconnexions de circuits intégrés AsGa dans le domaine subnanoseconde. Rev. Phys. Appl., 22(11), 1549-1559. DOI: 10.1051/rphysap:0198700220110154900. Cet article aborde les défis liés aux interconnexions dans les circuits intégrés, y compris la dissipation thermique et la fiabilité.

[74] Poupon, G. (2004). Packaging des circuits intégrés : Supports d'interconnexion. Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique. Cet article discute des différents types d'interconnexions et des matériaux utilisés pour améliorer la résistance à la corrosion.

[75] Triantafyllou, A. (2006). Étude, réalisation et caractérisation d'interconnexions radiofréquences dans les circuits intégrés. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. Cette thèse examine les propriétés des interconnexions et les solutions pour améliorer leur performance, y compris l'utilisation de nanomatériaux.

[76] Encyclopédie Universalis. Circuits intégrés. Cet article fournit une vue d'ensemble sur les circuits intégrés, leur structure et les défis associés aux interconnexions.

[77] Patente EP0090704A1. Circuit intégré prédiffusé, et procédé d'interconnexion des cellules de ce circuit. Cette référence décrit des méthodes d'interconnexion qui peuvent inclure des stratégies pour prévenir la corrosion

Glossaire

Glossaire

Les nanomatériaux : sont des matériaux dont les structures ont au moins une dimension à l'échelle nanométrique (1 à 100 nanomètres), ils possèdent des propriétés uniques qui diffèrent de celles des matériaux à plus grande échelle, en raison de leur taille réduite et de leur rapport surface/volume élevé.

Les circuits intégrés : c'est un ensemble de composants électroniques (transistors, résistances, etc.) intégré dans une seule puce de matériaux semi-conducteurs. Ils ont été utilisés pour réaliser des fonctions électroniques variées dans des dispositifs tels que les ordinateurs et les téléphones.

Interconnexion : l'interconnexion désigne la liaison physique et logique entre plusieurs réseaux ou systèmes permettant ainsi la communication entre eux. Cela peut inclure la communication de réseaux de communications ou d'ordinateurs, facilitant l'échange de données et l'accès aux services.

Nanotechnologie : est un domaine scientifique qui étudie et manipule la matière à l'échelle nanométrique, elle englobe la conception, les fabrications et l'application de structures et de dispositifs à cette échelle, avec des applications dans divers secteurs tels que la médecine, l'électronique et les matériaux.

Nanofil : les nanofils sont un type de membrane ou de nanomatériaux filtrants qui possèdent des pores à l'échelle nanométrique.

Caractérisation : fait référence aux méthodes et aux techniques utilisées pour analyser et évaluer les propriétés physiques et chimiques et mécaniques d'un matériau ou d'un dispositif. Cela permet de comprendre le comportement du matériau dans différentes conditions.

Dépôt : est un processus dans lequel un matériau est appliqué sur une surface pour former une couche ou un film. Ce processus est essentiel dans la fabrication de circuits intégrés et d'autres dispositifs électroniques.

CVD : Le dépôt chimique en phase vapeur (ou CVD pour l'anglais *chemical vapor deposition*) est une méthode de dépôt sous vide de films minces, à partir de précurseurs gazeux.

PVD : Le dépôt physique en phase vapeur (ou PVD pour l'anglais *physical vapor deposition*) est un ensemble de méthodes de dépôt sous vide de films minces.

Résistivité : est une propriété physique qui quantifie la résistance d'un matériau au passage du courant électrique. Elle est généralement exprimée en ohm-mètre et dépend de la température et de la composition du matériau.

Conductivité : la conductivité est l'inverse de la résistivité et mesure la capacité d'un matériau à conduire le courant électrique, elle est exprimée en siemens et dépend également de divers facteurs comme la température.

Le champ électrique : Un champ électrique est un champ de force invisible créé par l'attraction et la répulsion de charges électriques (la cause du flux électrique) et se mesure en Volts par mètre (V/m). L'intensité du champ diminue à mesure qu'augmente la distance à sa source.

Résistance quantique : la résistance quantique se réfère à un phénomène observé dans les systèmes quantiques où la résistance électrique prend des valeurs quantifiées. Cela se produit souvent dans des dispositifs à l'échelle nanométrique ou dans des systèmes supraconducteurs.

Capacité quantique désigne la capacité d'un système quantique à stocker des charges électriques sous forme d'énergie potentielle, elle est influencée par les propriétés quantiques du système comme son niveau d'énergie.

Capacité électrostatique : la capacité électrostatique mesure la capacité d'un objet à stocker une charge électrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique, elle dépend de la géométrie de l'objet et du milieu environnant.

La fiabilité désigne la capacité d'un système ou d'un composant à fonctionner correctement sur une période donnée sans défaillance, c'est un critère essentiel dans le développement de produits technologiques.

MTF temps moyen avant défaillance est une mesure statique qui indique le temps moyen qu'un dispositif fonctionne avant qu'il ne tombe en panne, il s'applique généralement aux systèmes non réparables.

Titre :Étude sur les nanomatériaux comme interconnexion dans les circuits intégrés

Résumé :

Ce mémoire a pour but d'étudier, explorer les différents points qui rends les nanomatériaux utiles et applicable dans les interconnexions qui sont surjettent a différentes perturbations. En effet, la miniaturisation des circuits a conduits entre autre a exploré des nanomatériaux dont les propriétés sont très convoites qui vont aboutir a de nouvelle piste afin d'améliorer les performances des circuits intégrés. il s'agit d'abord de s'intéresser au matériaux standard tel que le cuivre et l'aluminium afin de définir les problèmes et les failles majeurs qui réduit les performances des circuits voire les détériorent. Puis on se dirige progressivement vers les principaux matériaux à base de carbones tels que les nanotubes de carbones et le graphènes dont l avenir est prometteuse. Cependant, leurs application dans les circuits intègres s avère délicate voir complexe en vue de ses techniques d'élaborations et caractérisations ainsi que leurs cout dont nous allons aborder dans ce mémoire.

