

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière: Électronique

Spécialité: Microélectronique.

Présenté par :

Khoudria M^{ed} Amine&Tifoura Hani Ouassim

Thème

« Réalisation des doigts interdigités sur AlN »

Encadreur : Dr. Bakha Yamna

Co-encadreur : Pr. Aissat Abdelkader

Année Universitaire **2019-2020**

Remerciements

Nous aimerions dans ces quelques lignes remercier toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ce travail, tant au niveau humain qu'au niveau scientifique.

Ce travail a été réalisé au sein de **l'équipe MEMS &SENSORS** de la **Division Microélectronique et Nanotechnologie** et la **Plateforme MEMS** du **CDTA**.

Nous tenons tout d'abord à remercier **Dr Y.Bakha**, Chef **d'équipe MEMS &SENSORS** de la **Division Microélectronique et Nanotechnologie** et Responsable la **Plateforme MEMS** du **CDTA**, pour nous avoir accueilli et accepter de nous encadrer durant notre période de stage de Master II, pour tous ces conseils et sa disponibilité durant notre stage. Nous avons pu bénéficier à la fois de ses compétences scientifiques, et de sa grande disponibilité, tant pour résoudre les difficultés rencontrées lors des manipulations. Nous ajoutons ces qualités humaines, et en particulier sa patience et ces encouragements

Nous tenons aussi à remercier **Pr. Aissat Abdelkader** de Université Saad Dahleb Blida 1 d'avoir accepté de nous Co- encadré, dans ce travail.

Nous remercies également tout particulièrement **Monsieur H.Khalas** de **l'équipe MEMS &SENSORS** de la **Division Microélectronique et Nanotechnologie** et **responsable de la section Process & Caractérisation** de la **Plateforme MEMS** du **CDTA** de nous avoir guidés intelligemment tout au long de notre travail. Nous le remercions d'avoir accepté d'examiner ce travail, et de faire partie de ce jury.

Nous exprimant Nos remerciements les plus sincères à monsieur professeur à l'université de Saad Dahleb BLIDA 1, qui nous a bien fait l'honneur d'être président de notre jury.

Nous remercions également tous les membres de **l'équipe MEMS &SENSORS** et les membres de la **Plateforme MEMS** pour leur aide durant notre stage.

ملخص

الهدف الاساسي من هذا العمل هو صناعة او طباعة الاصابع IDT على مادة نيتريت الالومنيوم AlN المتداخلة من اجل صناعة لاقط او مستشعر حراري يقوم علي مبدأ الامواج الصوتية السطحية. واستخدم الطباعة على المواد باستخدام الطباعة علي ورق شفاف وقبل طباعة ذلك وطباعة عدة نماذج او ابعاد بين الاصابع لذلك قمنا Matlab القناع نقوم بمحاكات باستعمال باستعمال نوعين من المادة الصمغية وفي الاخير قمنا بالمعدنة وتحرير الاصابع ونطمح بعد ذلك الي عملية حصاد الاشارة الناتجة عن النموذج

Résumé

L'objectif de ce travail c'est la réalisation des doigts interdigités sur AlN , pour application a un capteur de température a base de SAW. Cette réalisation est basée sur le traitement de photolithographie a l'aide de masque imprimé suite une simulation par Matlab plusieurs échantillons ont été réalisés avec différents démontion et espacement entre les IDT. nous avons utilisé deux modèle de résines a savoir ; AZ5214E et RER500. Cette étude a comme but la réalisation des micro motifs .La dernière étape c'est la métallisation et la libération des doigts et la caractérisation des dispositif ainsi que la mesure de signal.

Abstract

The objective of this work is the realization of IDT-SAW on AlN substrate, for application to a SAW-based temperature sensor. This achievement is based on the photolithography process using a mask printed following a simulation by Matlab, several echelons were made with different thickness and spacing between the IDTs. The last step is the metallization and release of the electrical characterization of the device

Liste des acronymes et abréviation

MEMS:micro électro mechanical système

BAW:in english BulkAcousticWaves et en français onde acoustique de volume

SAW :in english Surface AcousticWaves et en français onde acoustique de surface

AlN :nitrure d'aluminium

IDT : interdigités

HSE :HygièneSécuritéEnvironnement

Si :Silicium

MEB :Microscope Electronique a Balayage

DRX :Diffraction des Rayon X

CMOS :Procédé de Micro fabrication

Sommaire

Remercîments	
Résume.....	
Liste des acronymes et abréviation.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction générale.....	

Chapitre I

Partie 1 : Lithographie et Transduction Piézoélectrique

I.1 La photolithographie.....	1
I.1.1 Introduction.....	1
I.1.2 La résine	1
I.1.3 Insolation.....	2
I.2 Piézoélectricité	4
I.2.1 Historique.....	4
I.2.2 Définition de la piézoélectricité	4
I.3 Généralités sur les ondes acoustiques	5
I.3.1 Définition	5
I.3.2 Propagation des ondes acoustiques	5
I.3.3 Principe de génération d'ondes acoustiques	6

Partie 2 : Généralités sur les capteurs SAW&propriété de L'AlN

I.2.1 Généralités sur les capteurs	7
--	---

I.2.1.1 Définition d'un capteur	7
I.2.1.2 Les différents types de capteurs	7
I.2.1.3 Historique des SAW.....	7
I.2.1.4 Le principe de fonctionnement.....	8
I.2.1.5 Transducteurs IDT.....	9
I.2.1.6 Définition d'un transducteur.....	9
I.2.1.7 Applications des transducteurs IDT dans différents domaine.....	9
I.2.2 Propriétés de L'AlN.....	11
I.2.2.1 Propriétés cristallographiques du nitrure d'aluminium.....	11
I.2.2.2 Propriété principale et électrique d'AlN.....	13

Chapitre II

Partie 1 : Démarche expérimentale et Technique de caractérisation

II.1 Protocole de protection et de sécurité HSE	15
II.2 Procédures expérimental.....	16
II.2.1 Le pré nettoyage :.....	16
II. 2.2 Nettoyage des échantillons	16
II.2.3 Nettoyage des substrats de silicium.....	17
II.3 Le découpage du wafer (Si (100)).....	18
II.4 Préparation des masques	19
II.4.1 Etape de conception des masques par le programme Matlab.....	19
II.4.2 Paramètre des dessins de masque	20
II.4.3 Les Masques	22
II.5 Réalisation des IDT par L'lithographie.....	23
II.5.1 Les étapes de réalisation.....	23
II.5.1.1 Etalement de la résine.....	23

II.5.1.2 Etape du SOFTBAKING.....	24
II.5.1.3 Etape de l'insolation.....	24
II.5.1.4 Etape de développement.....	25
II.5.1.5 Le Hard Baking.....	26
II.5.1.6 La gravure ou le dépôt du métal.....	26
II.6 Dépôts des couches minces métalliques (Libération d'IDT).....	26
II.6.1 Evaporation thermique	26
II.6.2 partie expérimentales.....	28
II.6.2.1 Evaporation thermique	28
II.6.2.2 Procédure expérimentales pour les dépôts.....	29

Partie 2 : Technique de caractérisation

II.7 Introduction.....	31
II.7.1 Microscope optique.....	31
II.7.2Profilomètre DEKTAK IIA 21S TEGM 2/84.....	32
II.7.3 Caractérisation morphologique microscope électronique à balayage MEB.....	33
II.7.3.1 Principe	33
II.7.4Caractérisation structurale Les Rayons (X) DRX.....	34
II.7.4.1 Principe de fonctionnement.....	34
II.7.4.2 Détermination de la taille des grains.....	35

Chapitre III

Résultats et Discussion

III.1 Introduction	38
III.2 Microscopie optique et image real du masque	38
III.2.1 Réalisation des masques.....	38
III.2.1.1 Calcule de l'erreur relative à l'impression.....	42
III.3 Résultats de la réalisation photolithographie	43
III.4 Caractérisations par profilometrierésine modèles AZ 5214E.....	44
III.5 lithographie avec résine RER500	47
III.6Metalisation	48
III.7Réalisations des IDT sur l'AlN.....	50
III.7.1 Caractérisations morphologiques par MEB.....	50
III.8Diffraction des rayons X DRX.....	52
III.9Partie lithographie de L'AlN.....	54
III. 10Conclusion	55

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1:La résine photosensible sous éclairement UV et développement par la technique « Lift off ».

Figure I.2:Regroupe les trois configurations de radiations UV.

Figure I.3: Illustration de l'effet piézoélectrique :**(a)**Direct et **(b)** Inverse [7]

Figure I.4:Propagation d'onde plane dans un solide [10].

Figure I.5:Schéma de fonctionnement d'un capteur [21]

Figure I.6:Dispositif à ondes acoustiques de surface (SAW) [6].

Figure I.7:Configuration des électrodes interdigitées IDT dans les SAW [14].

Figure I.8:Schéma d'un transducteur inter-digité déposé sur un substrat piézoélectrique [15].

Figure I.9:Décalage de fréquence dans un dispositif SAW soumis à une variation de température [17].

Figure I.10:(a) cristallines Würtzite-(b) Zinc Blende du AlN(b)[23]

Figure II.1: protocole d'accès a la plateforme MEMS : (a) avant le passage par le SAS- (b) accès a la zone chimie général

Figure II.2: découpages des substrats

Figure II.3 :découpages des substrats

Figure II.4 :Bac Ultra son.

Figure II.5 :Wafer de Silicium Type N Si (100) épais.

Figure II.6 :(a) -Nettoyé avec acétone (b) - Séchage

Figure II.7 :Découpage des échantillons du Si.

Figure II.8 :(a)-Nettoyage avec acétone (b) -Séchage

Figure II.9 :Image des masques conçus par Matlab pour impression sur Milar.

Figure II.10 :Image des masques réalisés sur le Milard pour le projet CT-SAW/MEMS-CDTA.

Figure II.11 :Technique de la photolithographie de la Plateforme MEMS/CDTA.

Figure II.12 :(a) - Centrifugeuse (b) Echantillon avec résine étalée

Figure II.13 :Appareil d'insolation

Figure II.14 :Système de développement P-MEMS.

Figure II.15 :préparation du bain de développement.

Figure II.16 :Système de développement P-MEMS.

Figure II.17 :Schéma descriptif du procédé d'évaporation thermique.

FigureII.18 :Lebatie de l'évaporation thermique du CDTA.

Figure II.19 :Evaporation de la poudre d'Aluminium

Figure II.20 :Microscope électronique à balayage CDTA, Service Caractérisation.

Figure II.21 :illustre l'ensemble des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon.

Figure II.22 :Diffractomètre D8 Advance Bruker DMIL Sévices Caractérisation.

Figure II.23 :Schéma représentant le principe de la diffraction des rayons X

Figure II.24 :La définition de β à partir de la courbe de diffraction des rayons X

Figure II.25 :Microscope optique de la plateforme MEMS

Figure II.26 :Profilomètre modèle DEKTAK IIA 21S TEGM 2/84 disponible à la Plateforme MEMS au CDTA

Figure III.1 :Paramètre des dessins de masque

Figure III.2 :Masque utilisé.

Figure III.3:Depots de l'Al par Evaporation thermique.

Figure III.4 :Image reel des masque utiliser.

FigureIII.5 :Image du Wafer d'AlN/Si.

Figure III.6 :Découpage de substrat d'AlN/Si

FigureIII.7 :Image SEM montrant la morphologie des couches minces d'AlN/Si.

FigureIII.8 :Spectres de diffraction des rayons X des couches minces d'AlN/Si.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 :Propriétés élastiques du nitrure d'aluminium[19.20]

Tableau I.2 :Comparaison des vitesses acoustiques de l'AlN avec d'autres matériaux piézoélectriques

Tableau II.1 :Le tableau résume les Paramètres de dépôt.

Tableau III.1:comparaison des paramètres de la réalisation des masques par Matlab avec la maquette réelle.

Tableau III.2 : Caractérisation par microscopie optique des masques.

Tableau III.3 : Résumé l'erreur de l'impression dans les masques réalisés.

Tableau III.4:Montre le transfert du masque sur le substrat Si.

Tableau III.5: Récapitule le transfert du masque sur la résine et les épaisseurs mesurées.

Tableau III.6 :réalisation des dispositifs avec les deux techniques de dépôt

Tableau III.7 :caractérisation optique du dispositif

Tableau III.8 :La reproductibilité de dispositif

Tableau III.9 :la métallisation de AlN

Tableau III.10 :caractérisation du dispositif AlN/Si

Introduction générale

Introduction générale

Le travail que nous présentons rentre dans le cadre de projet socioéconomique de l'équipe MEMS & SENSORS du CDTA avec la collaboration de université de Blida1 . Le projet intitulé : « **Conception et réalisation d'un capteur de température à base de SAW compatible avec la technologie CMOS 1µm (Acronyme : CT-SAW/CMOS-1µm)** »

L'objectif du projet : la simulation, la conception et la réalisation d'un prototype de capteur de température à base de dispositifs SAWs (*Surface Acoustic Wave*) qui peuvent être couplés ou non à des structures phononiques (PnC). Ces capteurs intéressent divers secteurs socio-économiques (Villes et fermes intelligentes, installations industrielles, téléphonie, automobiles, etc.). La technologie des capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) repose sur le principe de l'effet piézoélectrique. Une onde électromagnétique (EM) est envoyée par une unité d'interrogation vers une antenne liée au SAW. Cette onde est convertie en une onde acoustique au moyen d'un transducteur inter-digité (peigne IDT) constitué d'électrodes métalliques déposées à la surface d'un matériau piézoélectrique (nous proposons ici l'utilisation de l'AlN).

Dans ce travail nous avons procédé à l'exécution d'une tâche importante dans ce projet qui est la réalisation des IDT à travers plusieurs étapes technologiques qui interviennent à la réalisation des transducteurs IDT.

Notre travail est présenté de la manière suivante : **Chapitre I**, ce chapitre est repartie en deux parties la première est consacrée à Lithographie et Transduction Piézoélectrique, la deuxième partie est Généralités sur les capteurs SAW & propriété de l'AlN. Le **chapitre II** présente la démarche expérimentale et technique de caractérisation. **Le chapitre III** est consacré au résultat et discussion.

Chapitre I

1. Lithographie et Transduction Piézoélectrique

***2. Généralités sur les capteurs SAW et Propriétés
de L'AlN***

Partie I

Lithographie et Transduction Piézoélectrique

I.1 La photolithographie

I.1.1 Introduction

Le mot "lithographie" signifie réellement l'écriture sur ou avec une pierre [1]. La lithographie est le processus d'imprimer un modèle géométrique d'un masque sur une couche mince de matériel appelée résine [2]. Les résines utilisées sont sensibles aux rayonnements tels que : rayons X, ions, ultraviolets [3]. C'est une étape très importante pour la fabrication des circuits intégrés [4].

Les étapes du procédé de photolithographie commencent par les dépôts d'un film mince de résine sur la surface d'un substrat. Elle est ensuite exposée à une radiation lumineuse. Lors de cette étape l'utilisation d'un masque pour former de zones opaques et transparentes, permet de définir le motif que l'on souhaite réaliser sur les substrats.

I.1.2 La résine

Une résine photosensible est une solution organique sensible aux photons de longueur d'onde allant de 200nm à 500nm. Selon sa composition, elle a deux comportements possibles quand on l'expose aux rayonnements de photons émettant dans la gamme des ultraviolets [3]. En plus, la résine photosensible doit être capable de produire des dispositifs submicroniques de haute qualité [4].

Il existe deux types de résine :

- **Résine positive** : les parties non exposées à la lumière sont insolubles, les parties exposées sont solubles.
- **Résine négative** : les parties non exposées sont solubles, les parties exposées sont insolubles.

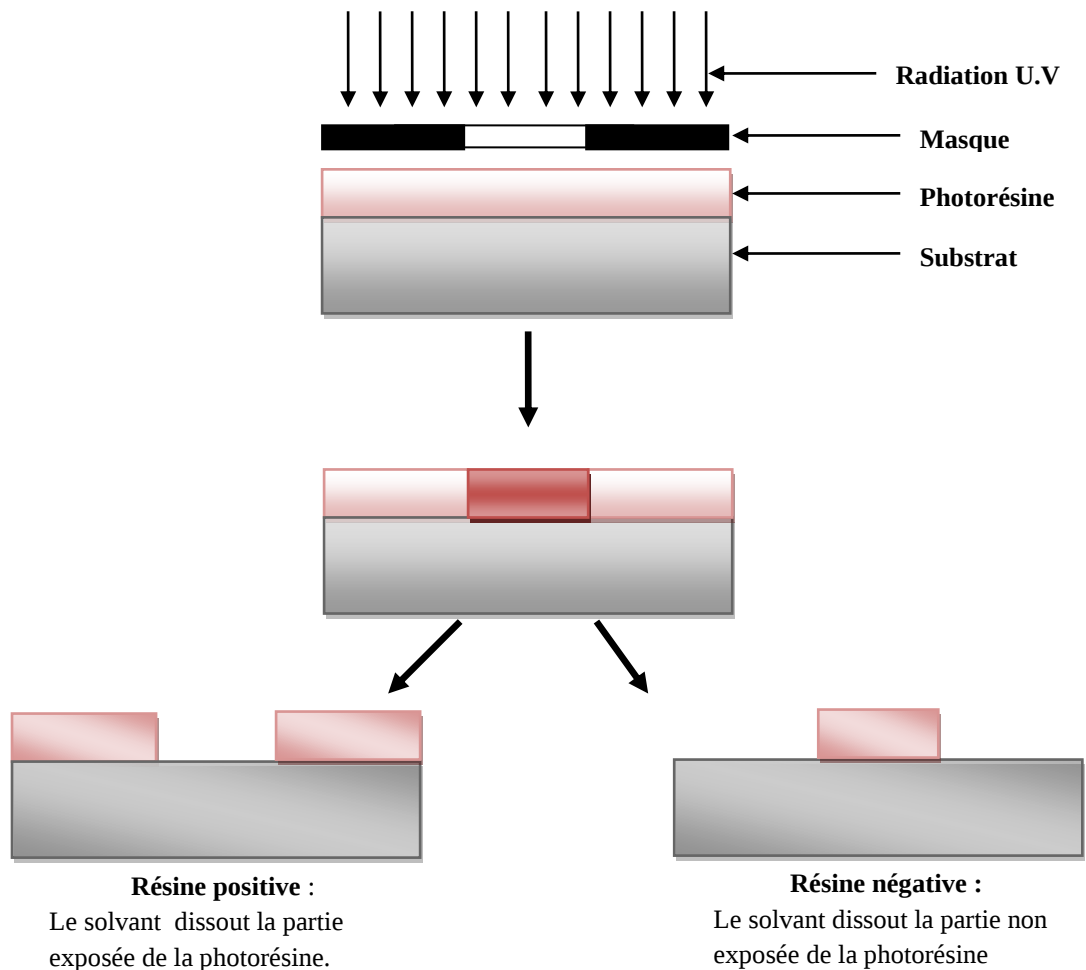


Figure I.1. La résine photosensible sous éclaircissement UV et développement par la technique « Lift off ».

I.1.3 Insolation

Dans le but de transférer les motifs sur les résines, on utilise un masque en contact direct avec la résine. Dans ce cas l'exposition se fait à travers un masque à l'aide d'un rayonnement UV.

Il existe plusieurs types d'insolation :

-Insolation de type électronique

Dans ce type d'insolation, l'insolation est effectuée par le balayage d'un faisceau électronique selon les motifs à tracer. Il s'agit ici d'un procédé dit par écriture directe qui nécessite la maîtrise constante du balayage du faisceau d'électrons réalisé par des plaques

défectrices, ce type d'insolation est trop long à réaliser par rapport aux autres (comme les radiations UV) [3].

-Insolation de type ionique

Dans ce type d'insolation, les faisceaux utilisés doivent être soit un faisceau focalisé qui balaie l'échantillon, soit un faisceau qui frappe l'échantillon à travers un masque [3].

-Insolation de type photonique

C'est une insolation qui consiste à exposer les échantillons aux rayonnements ultraviolets UV proches ou lointains (émis par une lampe à vapeur de mercure ou un laser). Les rayons X sont également utilisés [5].

-Les configurations des radiations UV

Il existe trois configurations différentes de radiations UV dans les machines d'alignement de masque, la **Figure I.2**. Regroupe les trois configurations de radiations UV.

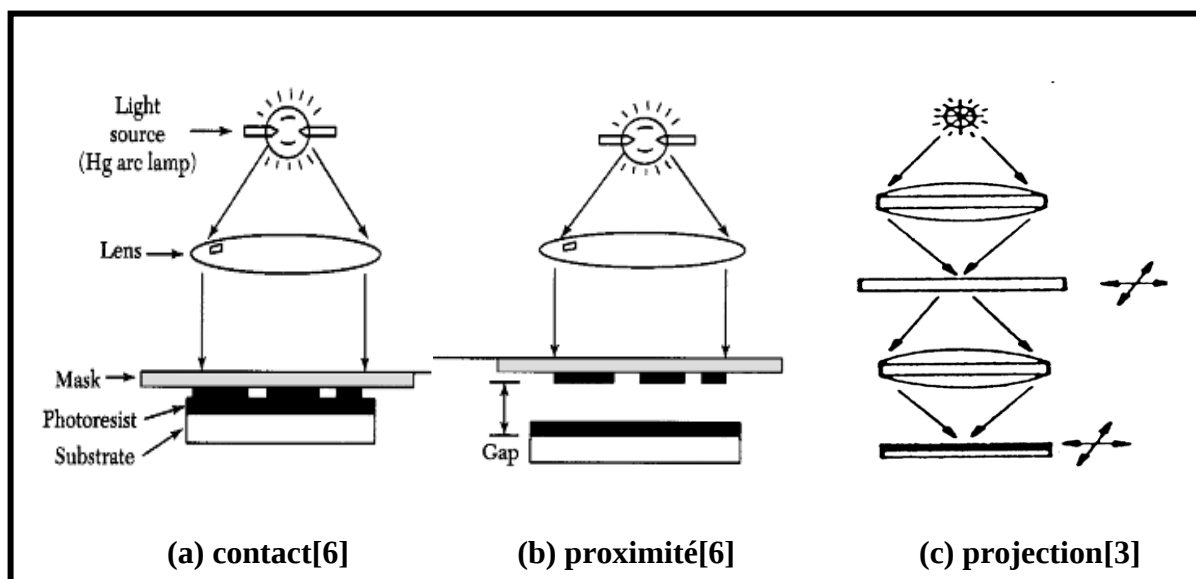


Figure I.2. Regroupe les trois configurations de radiations UV.[3-6]

I-2Piézoélectricité

I.2.1 Historique

Le préfixe “ Piézo” vient du mot grec « piezein » qui veut dire presser ou appuyer. L'utilisation du terme Piézoélectrique a été suggérée par **Herman Hankel** en 1881.

La première application de la piézoélectricité fut le sonar de Paul Langevin pendant la première Guerre mondiale. A partir d'une lame de quartz collé entre deux plaques d'acier et d'un hydrophone, il fut possible par la mesure du temps écoulé entre l'émission d'une onde acoustique et la réception de son écho de calculer la distance à l'objet.

En 1922 W.G Cady introduit le concept de résonateur piézoélectrique avec la possibilité de contrôle de fréquence. Ce concept fut fortement approfondi par W.P Mason grâce à ses nombreux travaux sur le filtrage acoustique. [7]

Au cours de la deuxième guerre mondiale, de nouveaux matériaux piézoélectriques apparaissent qui sont les céramiques piézoélectriques de synthèse composées d'oxydes à structure pérovskite tels que : titanate de baryum (BaTiO_3) puis le zircono-titanate de plomb (PZT). Ces matériaux possèdent des coefficients piézoélectriques bien supérieurs à ceux des cristaux naturels et la possibilité de faire varier les propriétés en les dopant par divers ions métalliques. Ce qui a fait d'eux une grande avancée pour le développement des dispositifs piézoélectriques. Par la suite, il y a eu l'apparition d'autres matériaux qu'on inappropriée à titre d'exemple : le Niobate de Lithium LiNbO_3 , Tantalate de Lithium LiTaO_3 , l'AlN, l'oxyde de Zinc (ZnO). [7].

I.2.2 Définition de la piézoélectricité :

Certains matériaux cristallins se chargent électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique et, inversement (figure I.3), se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique, ils sont dits piézoélectriques (de grec signifiant pression et **ambre**). La contrainte extérieure déforme les mailles du réseau cristallin, dissociant ainsi le barycentre des charges positives et négatives ce qui fait apparaître une polarisation électrique [9]

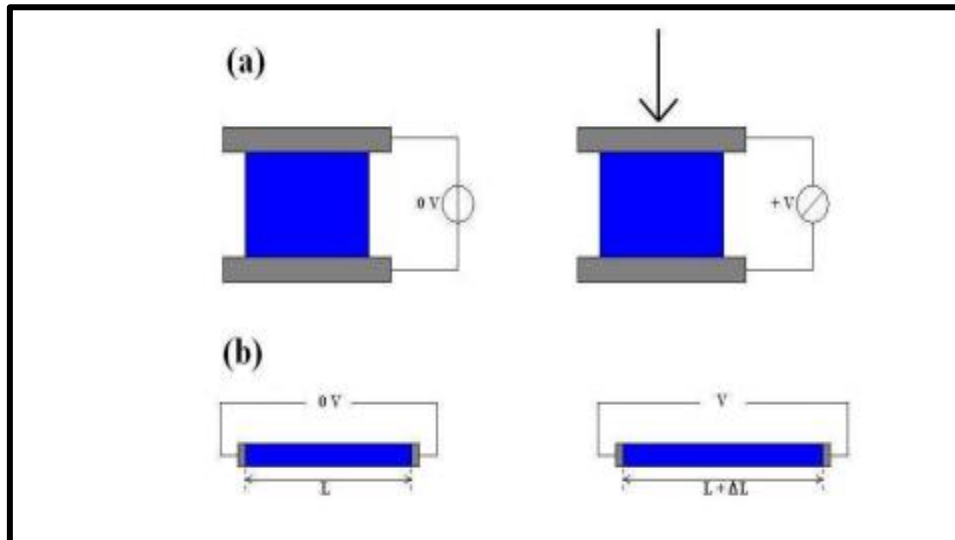


Figure I.3. Illustration de l'effet piézoélectrique : **(a)** Direct et **(b)** Inverse [7]

-l'effet Direct : lorsque nous appliquons une différence de potentiel aux matériaux, nous obtenons une déformation.

-l'effet Inverse : lorsque nous appliquons une contrainte aux matériaux, nous obtenons une différence de potentiel il répond par une différence de potentiel.

I.3 Généralités sur les ondes acoustiques

I.3.1 Définition

Une onde sonore correspond à la propagation de perturbations mécaniques dans un milieu élastique. Ces perturbations sont perçues, entre autres, par l'oreille humaine qui les interprète comme des sons. La science qui étudie ces ondes s'appelle l'acoustique.

I.3.2 Propagation des ondes acoustiques

Quand on parle des ondes qui se propagent dans un solide piézoélectrique, on parle des ondes acoustiques (ou élastiques), dans le sens où l'onde considérée est une onde qui ne peut pas se propager dans le vide [10].

Les différents états de la propagation des ondes montrent que tous les types d'ondes sont la combinaison de deux types fondamentaux : **Ondes longitudinales** et **Ondes transversales** [10].

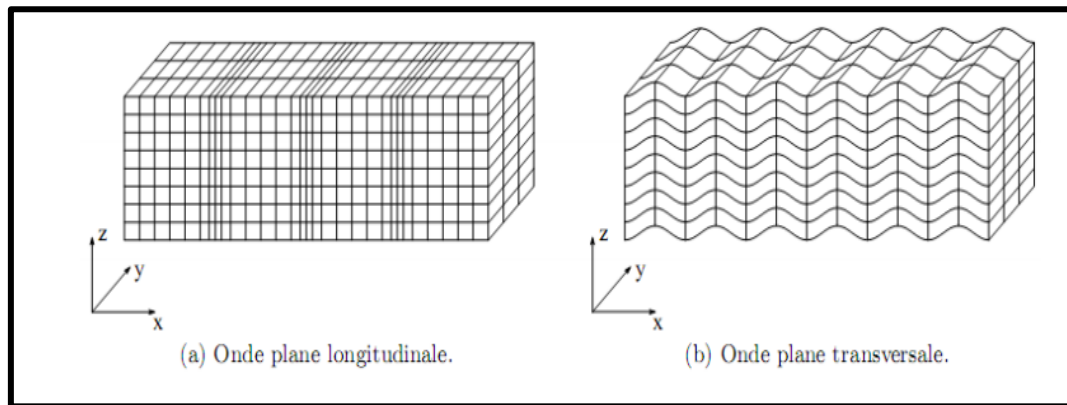


Figure I.4 : Propagation d'onde plane dans un solide [10],**(a)** déformation dans la direction longitudinale de la propagation et **(b)** propagation transversale où la déformation du milieu est perpendiculaire à la direction de la propagation de l'onde.

-

I.3.3 Principe de génération d'ondes acoustiques :

Le principe de génération d'ondes acoustiques est basé sur les propriétés électroacoustiques de certains matériaux piézoélectriques. On cite ; le Quartz SiO_2 , le Niobate de Lithium LiNbO_3 , l'oxyde de Zinc ZnO , l'AlN etc...

Ces matériaux ont comme propriété de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement, avec un coefficient de conversion qui dépend du facteur de couplage électro-acoustique K_2 qui change d'un matériau à un autre. Cette propriété permet de générer des ondes acoustiques dans le matériau par application d'un potentiel électrique alternatif, et selon le type de ces ondes on peut classer les dispositifs à ondes acoustiques en quatre groupes [10] :

- Les dispositifs à ondes de volume (BAW, pour BulkAcousticWaves)
- Les dispositifs à ondes de surface (SAW, pour Surface AcousticWaves)
- Les dispositifs à modes de plaque
- Les dispositifs à ondes guidées dans une structure hétérogène.

Partie II

***Généralités sur les capteur SAW et Propriété
de L'AlN***

II.1 Généralités sur les capteurs

II.1.1 Définition d'un capteur

Le capteur est un élément qui produit des signaux relatifs à la quantité mesurée et est un appareil utilisé pour collecter des informations sur un processus physique ou un phénomène physique et les traduire en signaux électriques pouvant être traités, mesurés et analysés n'importe quelle information du monde réel comme la température, la pression, la lumière, le son, le mouvement, la position, le débit, l'humidité, le rayonnement, etc. (figure I.5).

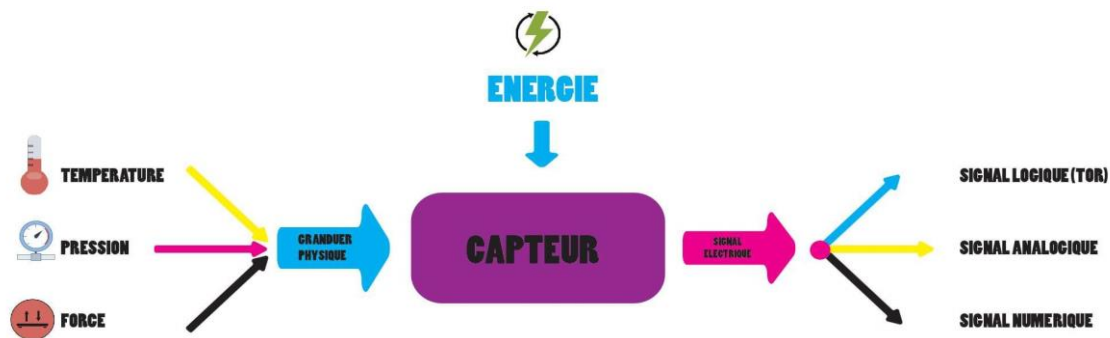


Figure I.5.Schéma bloc d'un capteur.

II.1.2 Les différents types de capteurs

D'une façon générale, on peut classer les capteurs selon deux critères :

- 1- **Grandeur mesurée** : capteur de position, de température, de vitesse, de force, de pression, etc.
- 2- **Caractère de l'information délivrée** : capteurs logique, capteurs analogique, ou capteurs numérique. [12]

II.1.3 Historique des SAW

Les dispositifs à ondes élastiques de surface, le plus souvent dénommés d'après leur acronyme anglais Surface Acoustic Wave (SAW) devices, sont le fruit de plus de quarante années de recherche et développement. Les dispositifs SAW sont aujourd'hui utilisés dans de très nombreux domaines. On les retrouve dans les téléviseurs et les magnétoscopes ainsi que dans la plupart des systèmes de communication. Ils sont notamment l'un des éléments clés de la téléphonie mobile. Fabriqués à plusieurs milliards d'exemplaires par an, les dispositifs SAW représentent un marché considérable et sont le cœur d'activité de nombreuses entreprises. [13] L'origine des dispositifs SAW remonte à la seconde guerre mondiale et plus

particulièrement aux travaux réalisés dans le domaine des radars. Il s'agissait alors de trouver un moyen d'améliorer leur résolution spatiale, en se basant sur les travaux théoriques de Klauder et al. [13]

II.1.4 Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de ces capteurs est basé sur la propagation des ondes acoustique en surface. Cette onde se propage le long de la surface d'un matériau solide, son amplitude décroît rapidement, le plus souvent de façon exponentielle avec la profondeur de la matière. [10]

Les dispositifs à ondes acoustiques de surface sont constitués d'un substrat piézoélectrique ou d'une structure multicouches composée au moins d'un film mince piézoélectrique déposé sur un substrat piézoélectrique ou non piézoélectrique. Des électrodes métalliques, généralement en Or ou en Aluminium, sont ensuite structurées en transducteurs inter-digités (IDT), par la technique de lithographie optique et de gravure sur le substrat ou la structure choisie. [14].

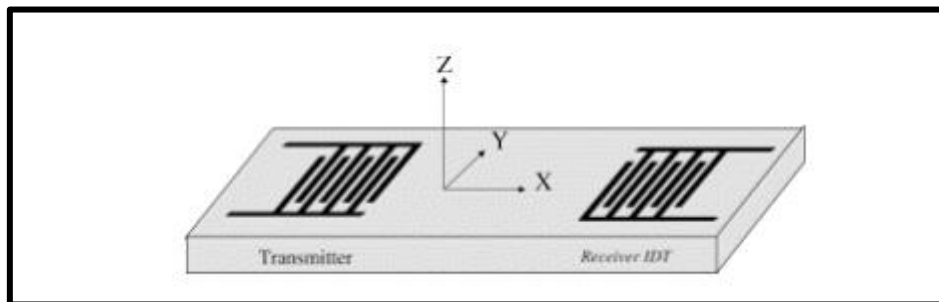


Figure I.6 : Dispositif à ondes acoustiques de surface (SAW) [6].

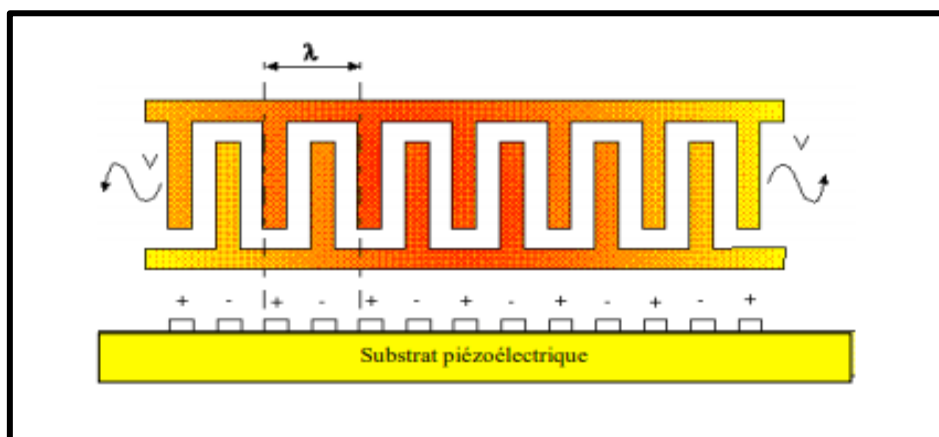


Figure I.7 : Configuration des électrodes interdigités IDT dans les SAW[14].

II.1.5 Transducteurs IDT

Le sujet de la transduction électromécanique à attirer une grande attention de la communauté chercheur et industrielle à l'arrivée des microsystèmes (MEMS pour Micro-Electro Mechanical Systems dans les années 1980.

II.1.6 Définition d'un transducteur

Le transducteur, représente le convertisseur entre deux domaines d'énergie en question sans aucune électronique ou traitement de signal. Dans le cas de transducteurs électroacoustiques et électromécaniques, c'est l'énergie électrique qui est transformée en énergie acoustique ou mécanique et vice versa [16].

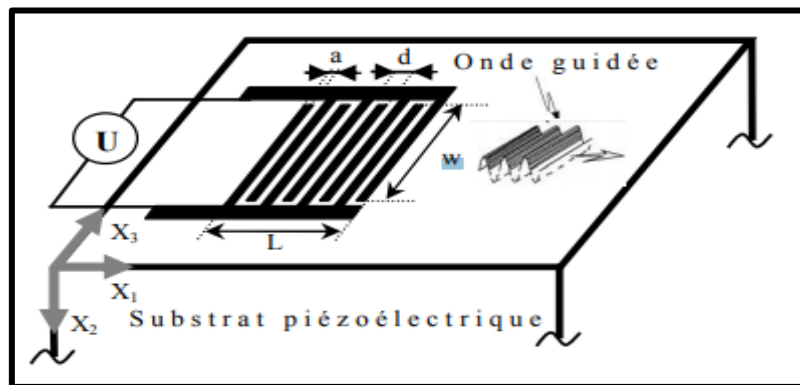


Figure I.8 : Schéma d'un transducteur inter-digité déposé sur un substrat piézoélectrique[15].

II.1.7 Applications des transducteurs IDT dans différents domaines

Les IDT sont utilisés dans différents domaines tel que :

-Applications à la détection des agents chimiques et biologiques

Pour la détection d'agents chimiques ou de substances biologiques, il faut distinguer deux cas de figures : Les substances en phase gazeuse et les substances en phase liquide.

-Applications au traitement du signal : tel que le Filtrage, Décodage.

-Applications à l'imagerie médicale : ce type de transducteur est utilisé dans différent instrument médicale.

-Applications dans la géophysique

La géophysique s'intéresse à la propagation des ondes dans le sous-sol (éventuellement en milieu marin) [5]

-Applications à La détection des variations de taux d'humidité et de températures

***Pour la mesure du taux d'humidité**

Ils sont utilisés dans le contrôle du taux d'humidité dans l'atmosphère, ces détecteurs peuvent être introduits dans des unités industrielles nécessitant un taux d'humidité bien déterminé au niveau de la production et du stockage, comme c'est le cas pour l'agroalimentaire.

***Pour la mesure de variation de température**

Les détecteurs de variation thermique nécessitent des matériaux qui possèdent un coefficient de dilatation thermique important [17]. Ce type de détecteur peut être utilisé pour les : (incendies, contrôle de l'échauffement climatique, étude des changements climatiques dans l'espace...).

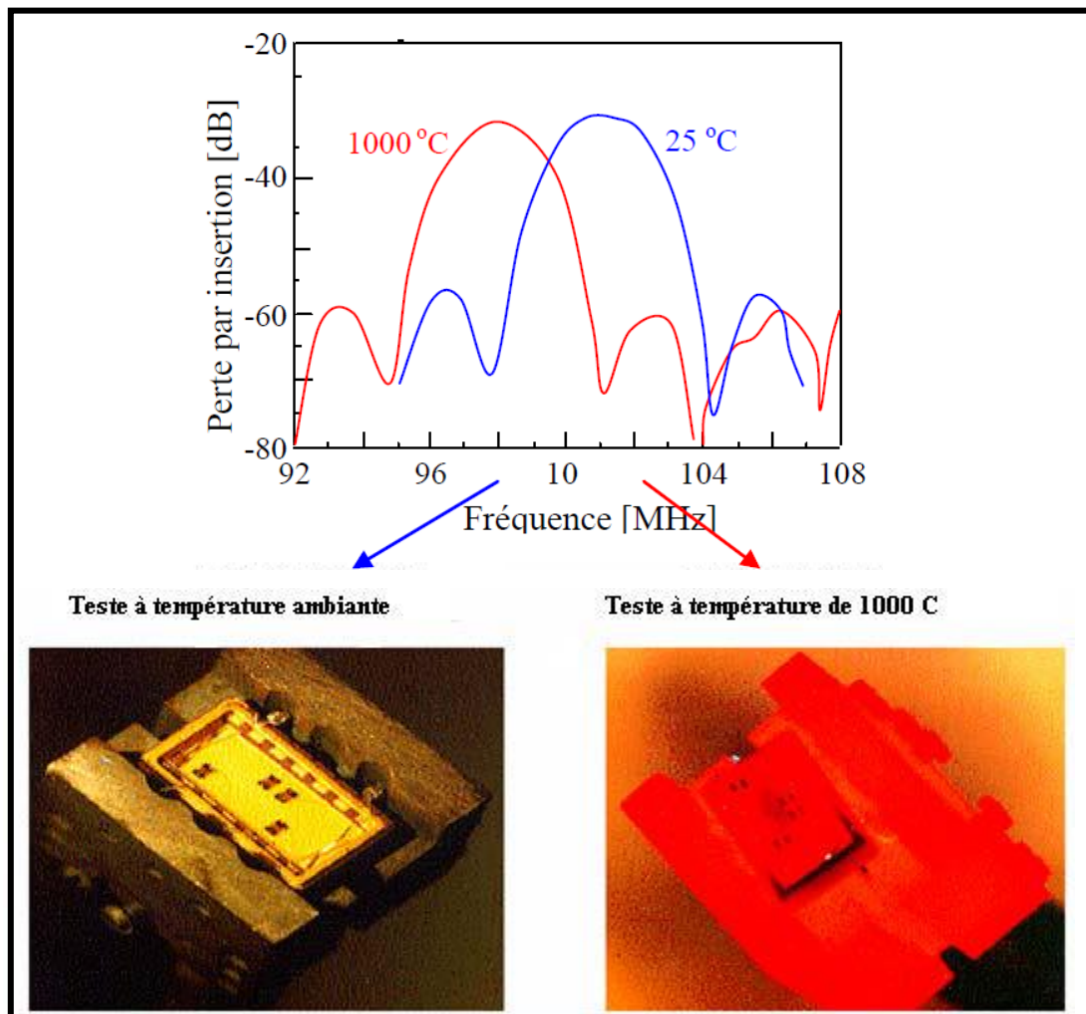


Figure I.9: Décalage de fréquence dans un dispositif SAW soumis à une variation de température [17].

Les détecteurs de variation de températures et de taux d'humidité peuvent aussi servir pour le suivi des microclimats dans les serres d'agricultures.

II.2 Propriétés D'AlN

II.2.1 Propriétés cristallographiques du nitrure d'aluminium

Le nitrure d'aluminium est un semi-conducteur piézoélectrique appartenant à la famille des nitrures pouvant cristalliser dans les conditions normales dans la phase hexagonale wurtzite de symétrie 6mm. C'est un matériau polycristallin dont les paramètres décrivant la structure sont le paramètre de maille $a=3.11\text{\AA}$, la hauteur de la maille perpendiculairement au plan des hexagones correspondant à l'empilement de deux plans cristallins $c=4.980\text{\AA}$ (avec $c/a=1.633$), et le paramètre u qui vaut 0.375 et en cas d'énergie minimum [18].

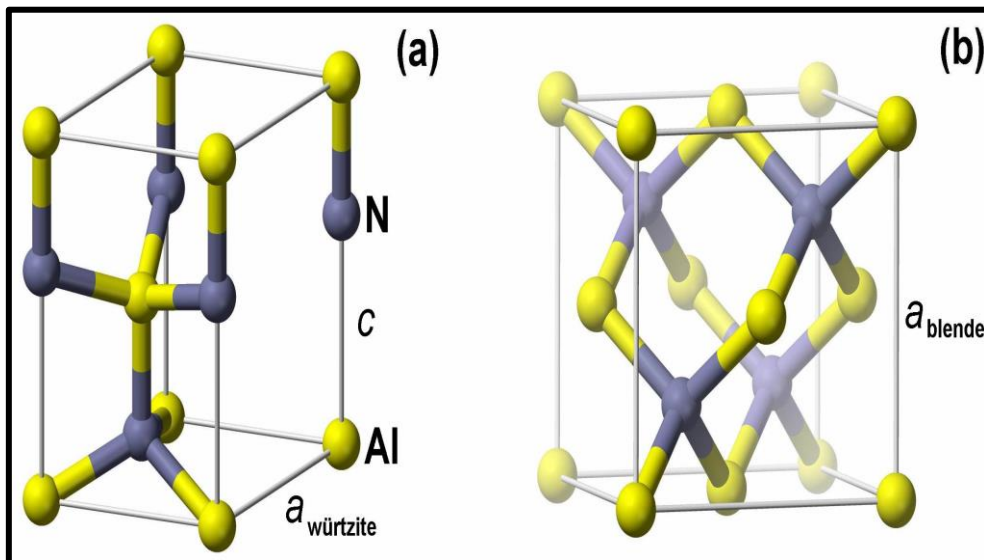


Figure I.10 : (a) cristallines Wurtzite- (b) Zinc Blende du AlN (b) [23].

De nombreuses études ont montré que les couches minces de nitrure d'aluminium présentent une croissance colonnaire [19, 20] suivant laquelle il est possible de générer différents modes d'ondes acoustiques. Le nitrure d'aluminium possède plusieurs caractéristiques qui sont citées dans le tableau :

Propriété	Valeur
Dureté(Mohs)	7
Module de Young E (GPa)	318
Résistance à la flexion (δf)(MPa)	>300
Densité (g.cm⁻³)	3.26
Coefficient de poisson(ν)	0.25
Constante diélectrique	9.2
Rigidité diélectrique(kV mm⁻¹)	16 -20
Résistivité électrique a 20°C(Ω.m)	>10¹⁴

Tableau I.1: Propriétés élastiques du nitrure d'aluminium[19.20]

Ci-dessus le tableau représente la Comparaison des vitesses acoustiques de l'AlN avec d'autres matériaux piézoélectriques

	Quartz	AlN	ZnO	PZT
Courant d'électrique relatif	455	8.5	8.8	350
Densité(kg/m³)	2650	3300	5665	7480
Vitesse acoustique en mode longitudinal(V_L)	5968	11400	6330	4500
Vitesse acoustique en mode transversal(V_s)	3310	6630	2883	2200
Couplage électromécanique en mode longitudinal (K_s)	-	0.25	0.45	0.45
Couplage électromécanique en mode transversal (K_1)	0.07	0.16	0.32	-

Tableau I.2 : Comparaison des vitesses acoustiques de l'AlN avec d'autres matériauxpiézoélectriques

II.2.2Propriété principale et électrique d'AlN

- Conduction thermique élevée, cinq fois celle de l'alumine,
- Isolation électrique,
- Coefficient de dilatation thermique faible,
- Haute température d'utilisation 600 c°,
- Haute pureté,
- Constante diélectrique faible,
- Résiste aux métaux fondus (aluminium, cuivre, lithium,...),
- Attaqué par les acides et alcalins

Chapitre II

Partie I :Partie expérimentale

Partie II :Technique de caractérisation

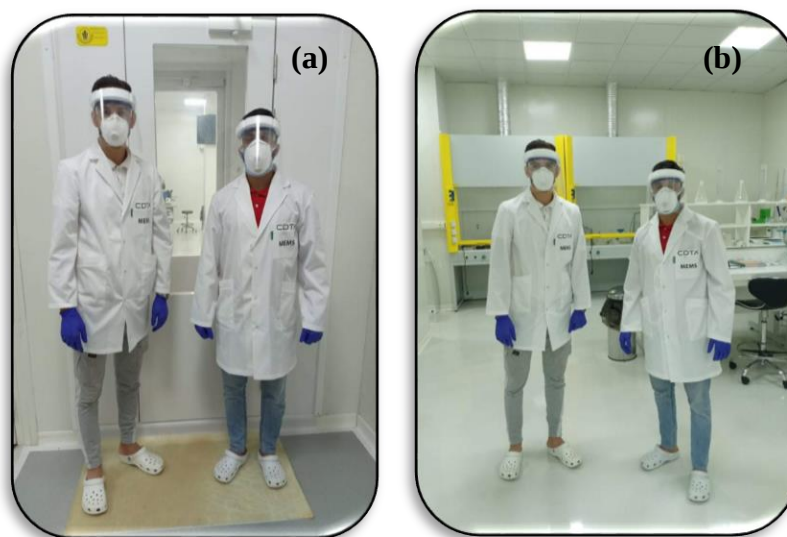
Partie I

Démarche expérimentale

II.1 Protocole de protection et de sécurité HSE :

Avant de procéder a la **Plateforme MEMS** il y a des règles a respectées : qui sont traduites par le protocole de la Plateforme obligation de porter :

- 1- Blouse,
- 2- Sabots pour laboratoire,
- 3- Gants,
- 4- Masque type FFP2,
- 5- Lunette de protection,
- 6- Visière,
- 7- Désinfection,



FigureII.1 : protocole d'accès a la plateforme MEMS : (a) avant le passage par le SAS- (b) accès a la zone chimie générale

II.2 Procédures expérimentale :

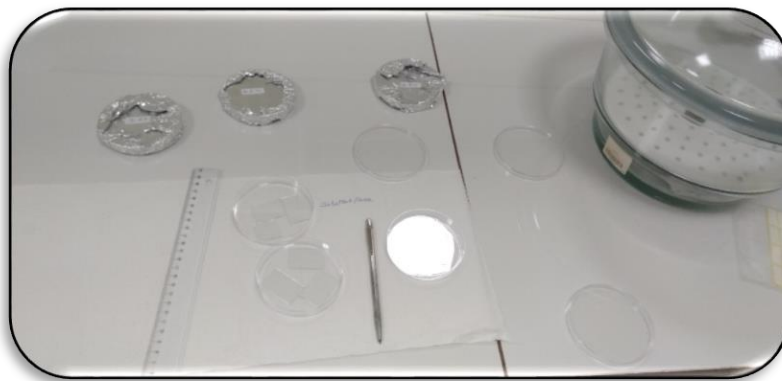
II.2.1 Le pré nettoyage :

➤ Le verre

Dans notre travail nous avons utilisé plusieurs types de substrats (verre, Silicium (Si), Silicium/AlN), dans le cadre de la préparation des substrats pour les différents dépôts on fait appel au :

➤ Découpage :

Les substrats du verre sont coupés à l'aide d'un stylo diamant en formes carrées (2cm×4cm),



FigureII.2 : Découpages des substrats

II. 2.2 Nettoyage des échantillons

Nous avons utilisé le protocole de nettoyages de la plateforme MEMS, nettoyage des échantillons par l'eau savonneuse avec le rinçage a la main jusqu'a la sensation d'un frottement .

✓ **Rinçage** par l'eau distillée une fois les échantillons découpés.



FigureII.3 : Rinçage par l'eau distillée.

✓ **Nettoyage chimique:**

On utilise un bain à ultrasons ou les substrats sont trempés dans différents bains pendant 12 minutes:

- Bain 01 : L'acétone,
- Bain 02 : L'éthanol,
- Bain 03 : L'eau distillée.



Figure II.4 : Bac Ultrasons.

✓ **Séchage :** Un séchage est ensuite effectué par une pompe d'air.

II.2.3 Nettoyage des substrats de silicium

La surface de silicium est fortement réactive (elle présente une grande affinité chimique), il est difficile d'obtenir un état de surface propre et le maintenir propre, ainsi que l'apparition de la couche native du SiO_2 à la surface du au contact avec l'air.

L'opération de nettoyage est une étape importante pour la réalisation des dispositifs miniaturisés.



Figure II.5 : Wafer de Silicium Type N Si (100) épais.

✓ **Nettoyage de wafer**

- 1- On prend le wafer avec les pincettes et on met des gouttelettes d'acétone à la surface et ensuite on nettoie avec le papier Joseph papier spéciale pour salle Blanche, il est utilisé pour effectuer des filtrages et nettoyage vu sa qualité en absorption assez facile des liquides et qu'il ne peluche pas. Actuellement il est utilisé pour la chimie comme notre cas,
- 2- Rinçage par l'eau distillée.
- 3- **Séchage** : Un séchage est ensuite mené par une pompe d'air.

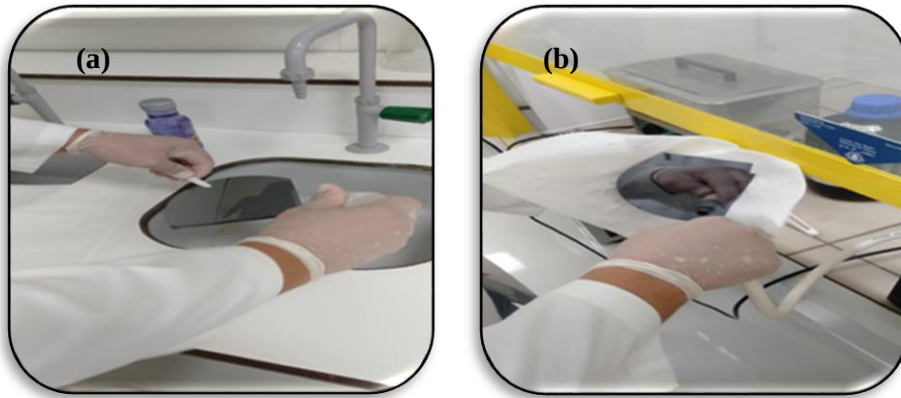


Figure II.6 : (a) - Nettoyé avec acétone (b) - Séchage

II.3 Le découpage du wafer Si (100)

Le découpage du wafer est effectué à l'aide d'un stylo diamant voir la figure ci-dessus;

Les échantillons du Si sont de dimension 3cm*1.5cm.

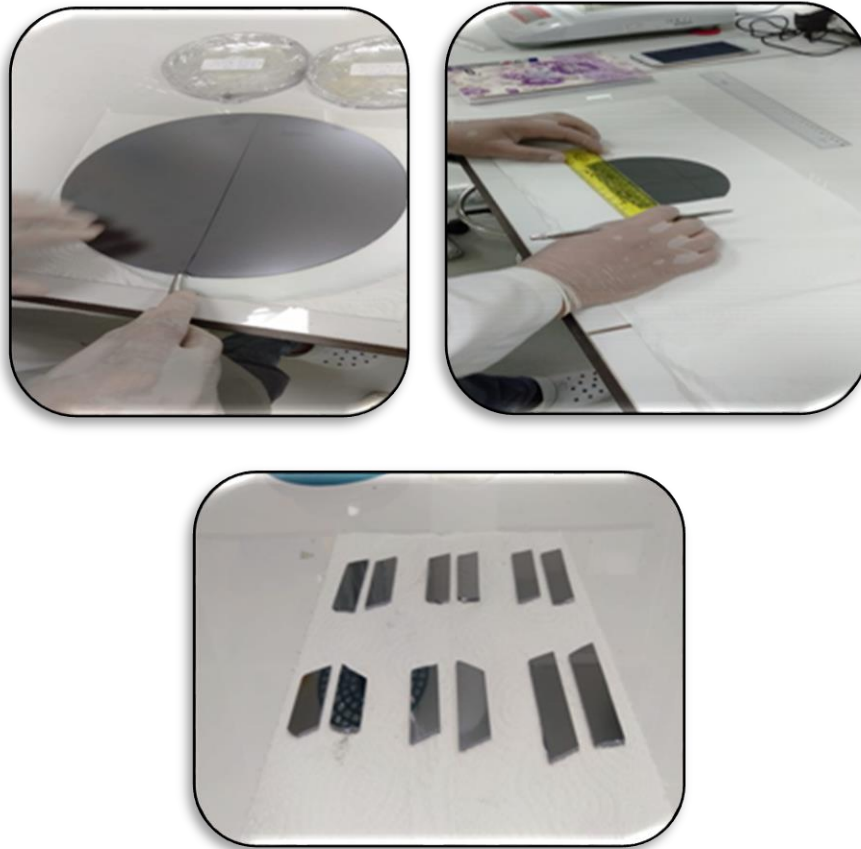


Figure II.7 : Découpage des échantillons du Si.

✓ **Nettoyage des substrats :** on garde le même protocole que la première fois.

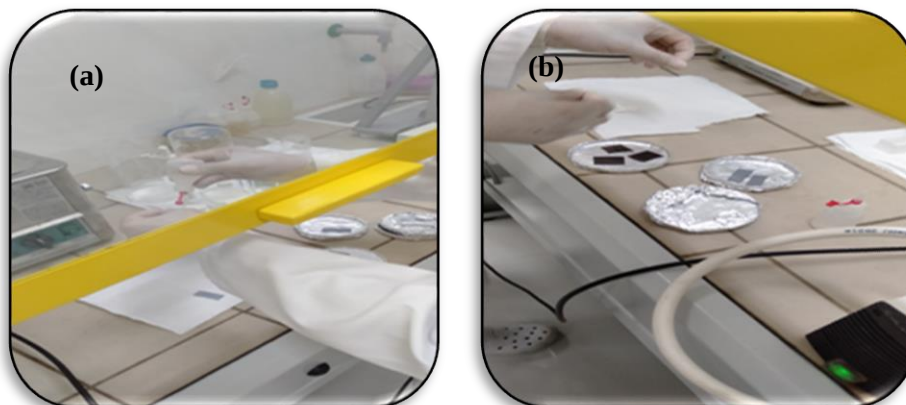


Figure II.8 : (a)-Nettoyage avec acétone (b) -Séchage

Remarque :

Le protocole de préparation des différents substrats est effectué à l'intérieur d'un paillasse chimique (Hotte Sorbonne de la plateforme MEMS du CDTA).

II.4 Préparation des masques

II.4.1 Etape de conception des masques par le programme Matlab

Cette étape est consacrée à la conception des masques à réaliser après études dans le cadre du projet, le programme choisi est le Matlab, les principaux paramètres dans cette étape c'est le choix des largeurs de peigne IDT et les pitch ou les distance entre les doigts.

II.4.2 Paramètre des dessins de masque

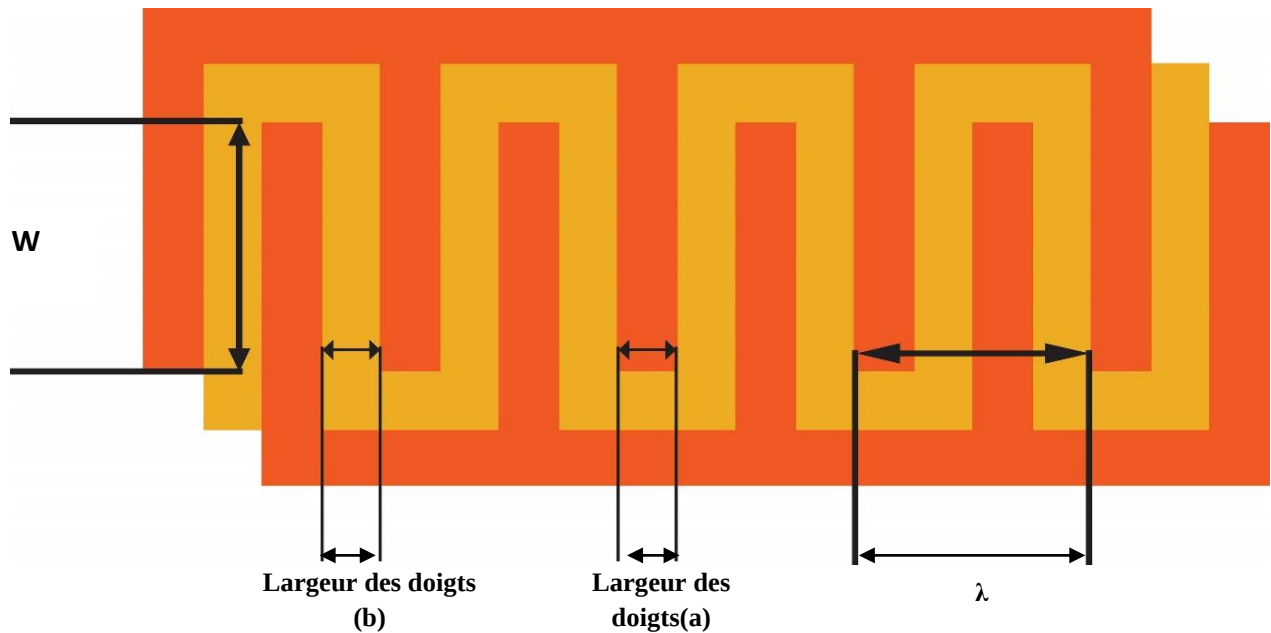


Figure III.1 : Paramètre des dessins de masque

Dxy (SAW2PR)

```

a = L*μm;      % largeur d'un élément du peigne IDT
b = Lp*μm;     % le pas
N_r_Bragg = Nbr      % Nombre de reflecteur du Miroir de Bragg
L_B = N*Lambda/2 ;  % cell2mat(Resultat_de_conception(20,2));
                    % espacement entre IDT et Miroir de Bragg

```

-exemple des paramètres des motifs réalisé

D11 (SAW2PR) :

```

a = 100*1e-6;    % largeur d'un élément du peigne IDT
b = 100*1e-6;    % le pas
N_r_Bragg = 20    % Nombre de reflecteur du Miroir de Bragg

```

```

L_B    = 3*Lambda/2 ; % cell2mat(Resultat_de_conception(20,2));
                                % espacement entre IDT et Miroir de Bragg
Np     = 10; %cell2mat(Resultat_de_conception(12,2));
Wa     = 5e-3; %cell2mat(Resultat_de_conception(32,2));
D_Delay = Lambda; % cell2mat(Resultat_de_conception(14,2)); Delay length

```

D12 (SAW2PR):

```

a = 150*1e-6; % largeur d'un élément du peigne IDT
b = 150*1e-6; % le pas
N_r_Bragg = 20; %cell2mat(Resultat_de_conception(22,2));
                                % Nombre de réflecteur du Miroir de Bragg
L_B    = 3*Lambda/2 ; % cell2mat(Resultat_de_conception(20,2));
% espacement entre IDT et Miroir de Bragg
Np     = 10 ; %cell2mat(Resultat_de_conception(12,2));
Wa     = 5e-3; %cell2mat(Resultat_de_conception(32,2));
D_Delay = Lambda; % cell2mat(Resultat_de_conception(14,2)); Delay length

```

D16 (SAW2PR):

```

a = 75*1e-6; % largeur d'un élément du peigne IDT
b = 75*1e-6; % le pas
N_r_Bragg = 1; %cell2mat(Resultat_de_conception(22,2));
                                % Nombre de réflecteur du Miroir de Bragg
L_B    = 10*Lambda/4 ; % cell2mat(Resultat_de_conception(20,2));
% espacement entre IDT et Miroir de Bragg
Np     = 20; cell2mat(Resultat_de_conception(12,2));
Wa     = 5e-3; %cell2mat(Resultat_de_conception(32,2));
D_Delay = 5*Lambda; % cell2mat(Resultat_de_conception(14,2)); Delay length

```

D17 (SAW2PR):

```

a = 150*1e-6; % largeur d'un élément du peigne IDT
b = 150*1e-6; % le pas
N_r_Bragg = 1; %cell2mat(Resultat_de_conception(22,2));
% Nombre de réflecteur du Miroir de Bragg
L_B    = 3*Lambda/2 ; % cell2mat(Resultat_de_conception(20,2));

```

% espacement entre IDT et Miroir de Bragg

$N_p = 10$; %cell2mat(Resultat_de_conception(12,2));

$W_a = 5e-3$; %cell2mat(Resultat_de_conception(32,2));

$D_Delay = 5 * \Lambda$; % cell2mat(Resultat_de_conception(14,2)); Delay length

D18 (SAW2PR):

$a = 100 * 1e-6$; % largeur d'un élément du peigne IDT

$b = 100 * 1e-6$; % le pas

$N_r_Bragg = 1$ % Nombre de réflecteur du Miroir de Bragg

$L_B = 3 * \Lambda / 2$; % cell2mat(Resultat_de_conception(20,2));

% espacement entre IDT et Miroir de Bragg

$N_p = 10$; %cell2mat(Resultat_de_conception(12,2));

$W_a = 5e-3$; %cell2mat(Resultat_de_conception(32,2));

$D_Delay = 5 * \Lambda$; % cell2mat(Resultat_de_conception(14,2)); Delay length

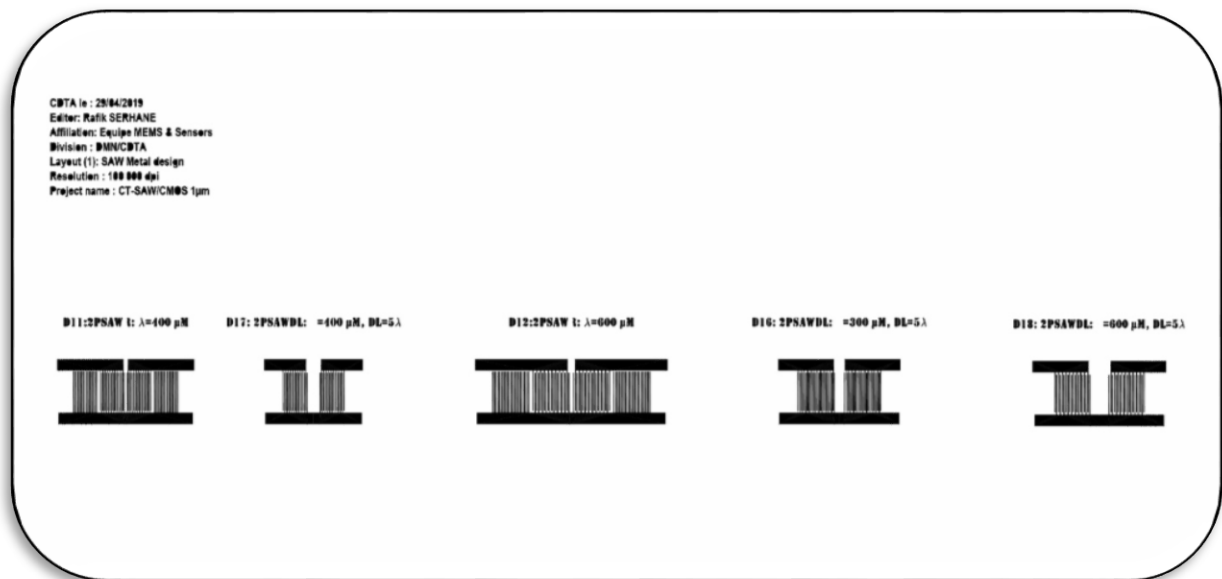


Figure II.9. Image des masques conçus par Matlab pour impression sur Milard. (P.MEMS)

II.4.3 Les Masques

Les masques préliminaires ont été réalisés sur un film plastique transparent à l'UV. Le transfert d'image vers la résine photosensible a été réalisé au préalable à travers ce masque.

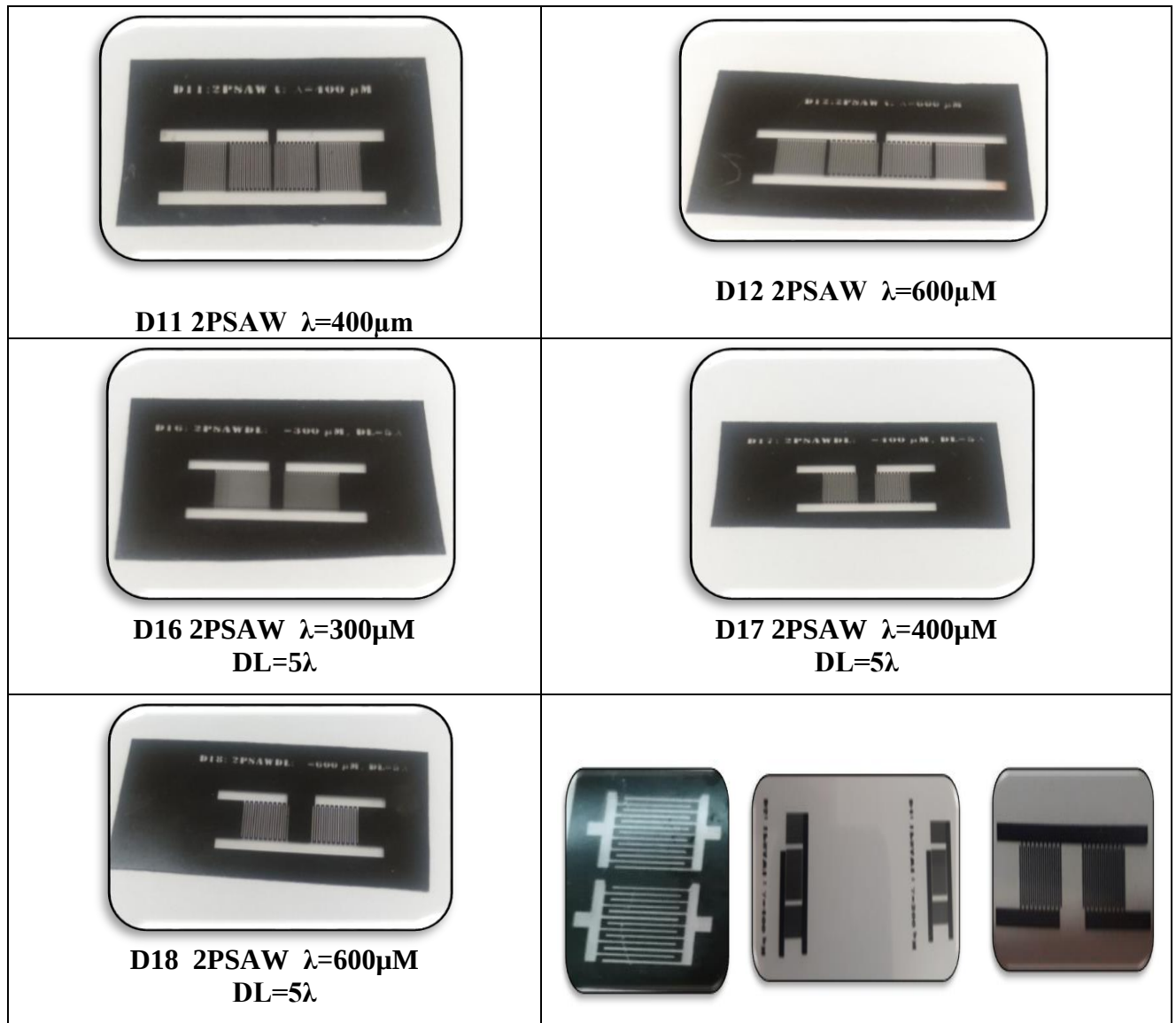


Figure II.10 Image des masques réalisés sur le Milard pour le projet CT-SAW/MEMS-CDTA.(P.MEMS)

II.5 Réalisation des IDT par la photolithographie

Pour la réalisation des doigts interdigités nous avons commencé par le Si type N épais afin de maîtriser la technique de la photolithographie de la Plateforme MEMS/CDTA.



Figure II.11 : Technique de la photolithographie de la Plateforme MEMS/CDTA.

- 1- Tournette,
- 2- Plaque chauffante,
- 3- Zone de développement,
- 4- Insolation,
- 5- Obscurité.

Le tout est placé dans une hotte Sorbonne.

II.5.1 Les étapes de réalisation

Dans cette partie nous avons fait appel au procédé de photolithographie **Figure II.11**. Technique de la photolithographie de la Plateforme MEMS/CDTA, qui est montrée par la suite :

II.5.1.1 Étalement de la résine

Nous avons effectué l'étalement de la résine avec une centrifugeuse de 3000 Tour/min, le procédé consiste à :

- 1- Placer les substrats sur les portes échantillons de la centrifugeuse

- 2- Dépôts des gouttelettes de résine sur les substrats
- 3- Centrifugation ou étalement.

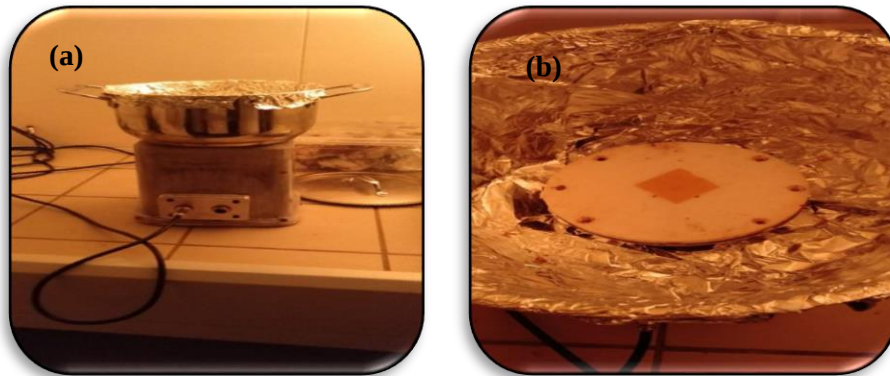


Figure II.12 : (a) - Centrifugeuse (b) Echantillon avec résine étalée

II.5.1.2 Etape du recuit primaire (SOFT BAKING)

L'échantillon est déposé sur une plaquette chauffante réglée à 80°C température pendant 90s, cette opération permet l'évaporation des solvants.



Figure II.13 : SOFT BAKING.

II.5.1.3 Etape de l'insolation

Ce processus consiste à exposer les échantillons en résine à la lumière UV (**Insolation par contact**).

Le processus est comme suit :

- 1- Placer le masque sur l'échantillon,
- 2- Alignement du masque à l'intérieur de l'insoleuse,
- 3- Allumer la lumière UV pendant un temps de 1 min 30s.



Figure II.14. Insolation.

II.5.1.4 Etape de développement

Une fois l'échantillon insolé on passe à l'étape de développement, cette étape consiste à libérer le motif que nous avons choisi pour passer aux dépôts du métal. Pour la réalisation nous avons besoin de :

✓ Préparation du développeur

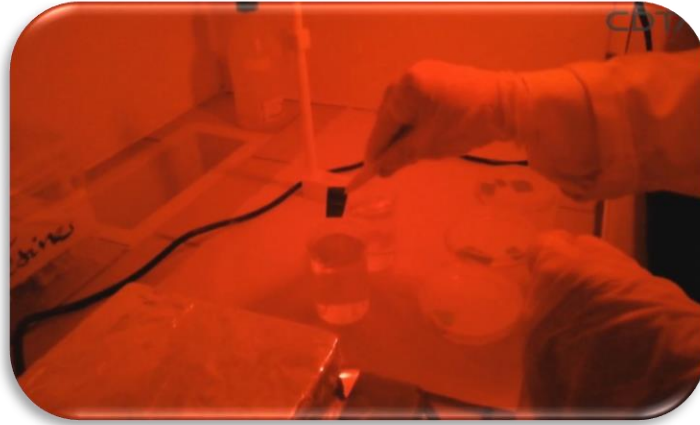


Figure II.15 : Préparation du bain de développement.(P.MEMS)

La solution que nous avons utilisée dans notre travail :

- ✓ 0.8mg de Na OH (Développeur)
- ✓ 80ml d'eau distillé solvant.

Après exposition au rayonnement UV et la préparation du développeur, l'échantillon est plongé dans la solution pour éliminer la partie de la résine ayant subi l'exposition, la solution est composée de 0.8mg de NaOH dans un 80ml d'eau distillé. Le développeur a érode les endroits qui ont été exposée à la radiation pendant 6s on trempe trois fois et on met dans l'eau distillé pour arrêter le process développement ou le sur développement .Il est nécessaire de contrôler le temps du développement afin d'éviter une sur-gravure autour des bords des motifs fins.



FigureII.16 : Système de développement P-MEMS.

II.5.1.5 Le Hard Baking

On dépose l'échantillon sur la plaquette à une température de 120°C pendant 1min 30s

.Une cuisson post-développement (ou « cuisson dure) du motif de photoresist est une méthode courante pour stabiliser les caractéristique imprimées afin de fournir des performances optimales. Cette étape de cuisson finale garanti l'élimination complète du solvant, améliorant l'adhérence dans le procédés.

II.5.1.6 La gravure ou le dépôt du métal.

N.B« Dans notre travail nous avons utilisé le « LIFT OFF », donc la dernière étape pour nous c'est le dépôt du métal ».

II.6 Dépôts des couches minces métalliques (Libération d'IDT)

Cette étape consiste à déposer les couches minces métalliques des IDT, cette étape c'est la dernière dans la réalisation des peignes interdigités.

II.6.1 Evaporation thermique

Le choix de la technique de dépôts des couches minces métallique pour notre travail était l'évaporation thermique cette technique consiste à chauffer le matériau (en phase liquide ou solide) sous vide jusqu'à ce que la pression de vapeur de ce dernier atteigne la valeur de l'évaporation du matériau, cette dernière forme un film mince en reposant sur le substrat. Dans ce cas la température nécessaire pour l'évaporation est obtenue par l'effet joule, par le passage d'un fort courant à travers la source [22]. La Figure II.17. Représente le Schéma descriptif du procédé d'évaporation thermique.

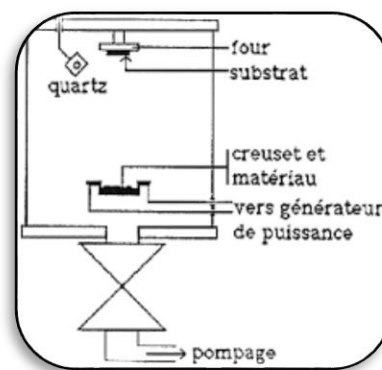


Figure II.17 : Schéma descriptif du procédé d'évaporation thermique.

La technique de l'évaporation c'est une technique très utilisée pour les dépôts des couches minces en phase vapeur sauf que parmi les inconvénients de cette dernière repose sur l'uniformité des couches minces dans toutes les directions, ce problème découle du fait que la croissance du film se fait dans la direction du flux de vapeur [22]. Aussi l'uniformité liée à la position de la source du dépôt (positionnement du creuset) par rapport au substrat, la forme de la surface du substrat et la distribution angulaire du flux de vapeur issu de la source [24]. Plusieurs solutions ont été proposées pour maximiser l'uniformité de l'épaisseur. Des techniques qui consistent à faire tourner le substrat autour d'un axe [23], ou sur deux axes [25]. L'uniformité de l'épaisseur est très importante, car les différentes propriétés d'un film mince dépendent de ses uniformités.

II.6.2 Partie expérimentales

II.6.2.1 Évaporation thermique

La Figure II.18 représente le bâti utilisé pour les dépôts des couches minces d'Al. Ce dispositif disponible au sein du CDTA services caractérisation DMIL, il est de type ALCATEL est constitué de:

- Une chambre (enceinte) de dépôt
- Un système de pompage connecté à la chambre de dépôt est équipé d'une pompe primaire (pompe mécanique). Elle est reliée à une pompe secondaire (pompe à diffusion d'huile) ;
- Un système de refroidissement à circuit d'eau est utilisé pour les contacts des électrodes du creuset ;
- Un porte substrat et un creuset en tungstène situés dans la chambre de dépôt ;
- Une alimentation électrique pour faire circuler un courant électrique d'environ 200A à travers le creuset de tungstène.

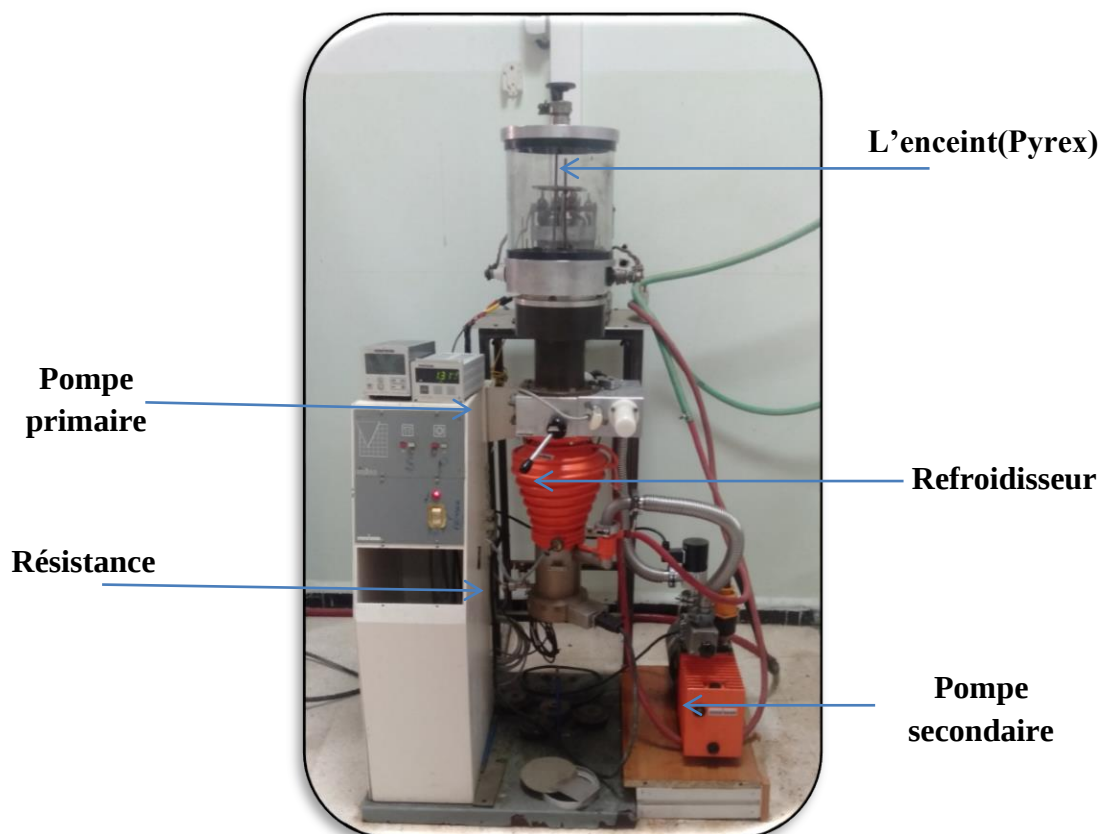


Figure II.18 : Le bâti de l'évaporation thermique du CDTA.

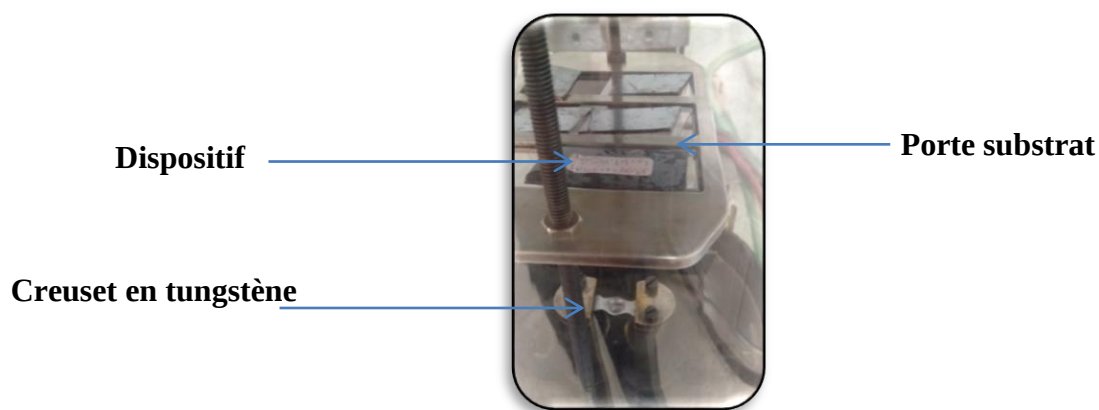


Figure II.18 : Le bâti de l'évaporation thermique du CDTA.

II.6.2.2 Procédure expérimentales pour les dépôts

Avant de procéder aux dépôts, nous devrons suivre les étapes suivantes :

- 1- Nettoyage de l'enceinte pour enlever les contaminations avec de l'acétone,
- 2- Déposer les échantillons dans le porte substrat,
- 3- Peser la quantité du métal à déposer et la placer dans le creuset,

Masse d'Al (mg)	40mg
Distance entre le creuset et le porte substrat (d)	12cm
Vide primaire	$2.57 \cdot 10^{-5}$ mb
Tension appliqué (DDP)	190v
Temps de dépôt	25 s
Vide secondaire	$8 \cdot 10^{-4}$ mb
Temps	3h

Tableau II.1 : Le tableau résume les Paramètres de dépôt.

Une fois la pression sous vide a été atteinte, une alimentation électrique fait circuler un courant électrique à travers le creuset, ceci entraîne un échauffement du creuset et de la poudre d'Al. Dès qu'on atteint la température de fusion d'Al (d'environ 661 C°), qui a duré 25 S, on observe :

- L'évaporation complète d'Al déposés au creuset,
- Un dépôt sur tous les substrats et la surface de l'enceinte à l'intérieur ;
- Une perte du vide qui a chuté jusqu'à une pression de $8 \cdot 10^{-4}$ mbar ;



Figure II.19 : Evaporation de la poudre d'Aluminium.

Partie 02

Technique de caractérisation

II.7 Introduction

Cette partie consiste à montrer les techniques de caractérisation que nous avons utilisées dans notre travail, après avoir réalisé notre processus de fabrication sur différents substrats cités précédemment, il est indispensable de les caractériser, propriétés structurales, morphologiques, optiques et électriques.

Pour ceci, il existe différentes techniques d'analyses et de caractérisation. Celles dont on a fait appel dans ce présent mémoire sont :

- ✚ Microscope optique : pour la caractérisation topographique de la surface
- ✚ Profilométrie Dektak : pour la détermination des épaisseurs et espacement.
- ✚ Microscopie Electronique à Balayage MEB : pour la caractérisation morphologique de la surface ;
- ✚ Diffraction des rayons X DRX ;

II.7.1 Microscope optique :

Le microscope optique ou ce qu'on appelle aussi un microscope photonique est un appareil d'optique qui est caractérisé par sa puissance optique et son pouvoir de résolution. Ce qui permet à la fois de grossir l'image d'un objet de petites dimensions et de séparer les détails de cette image.

✓ Principe de fonctionnement :

Le microscope optique utilise la lumière et il est doté de lentilles. Il comprend deux groupes optiques : l'objectif et l'oculaire. On place l'objet à observer devant le premier groupe. Si l'objet est au-delà de la distance focale, cela forme une image réelle renversée de taille différente ; l'image est plus grande que l'objet si celui-ci est situé à une distance inférieure au double de la distance focale de l'objectif. Le deuxième groupe de l'observateur est positionné de sorte que l'image soit dans son plan focal. Ainsi, l'œil observe une image « à l'infini » (pour un observateur standard), donc en relâchant les muscles chargés de l'accommodation, offrant un meilleur confort visuel.

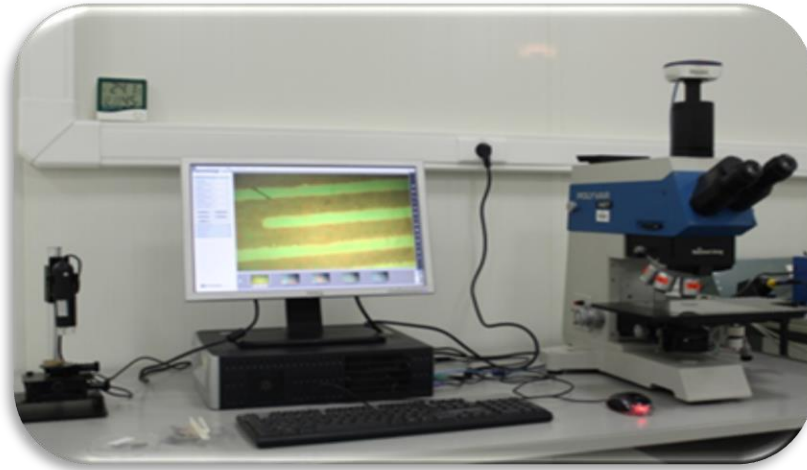


Figure II.20 : Microscope optique de la plateforme MEMS

- + Microscope POLYVART MET
- + Caméra numérique CMEX-10 CMOS USB2
- + Table X-Y miniature (MS15X-S1).

II.7.2 Profilomètre Dektak IIA 21S TEGM 2/84

Un profilomètre est un instrument utilisé pour mesurer le relief d'une surface, notamment dans le but d'en évaluer la rugosité ou la micro-géométrie.



Figure II.21: Profilomètre modèle DEKTAK IIA 21S TEGM 2/84 disponible à la Plateforme MEMS au CDTA

II.7.3 Caractérisation morphologique microscope électronique à balayage MEB :

Le microscope électronique à balayage (MEB ou SEM en anglais pour (scanningélectronmicroscopie)fournit des informations sous forme d'images lumineuses, résultat d'interaction d'un faisceau d'électrons avec un volume microscopique l'échantillon étudié (Figure II.22)

Nos observations ont été effectuées sur un microscope électronique à balayage de type JEOL(JSM-6360LV Scanning Electron Microscope), qui consiste à balayer successivement, ligne par ligne la surface de l'échantillon avec un faisceau d'électrons puis transmettre le signal du détecteur à un écran [1].



Figure II.22 : Microscope électronique à balayage CDTA, Service Caractérisation.

II.7.3.1 Principe

En principe un microscope électronique à balayage possède 3 détecteurs : un d'électrons secondaires, un d'électrons rétro-diffusés et un de photons "X". Les émissions non détectées se dissipent en chaleur dans les parois de la chambre de l'échantillon ou sont mises à la terre. Si on fait une spectroscopie d'électrons réémis par l'échantillon, la courbe obtenue présente 2 pics :

- 1 pic de faible énergie (< 50 eV) : c'est le pic des électrons secondaires
- 1 pic de forte énergie (> 50 eV) : c'est le pic des rétro-diffusés.

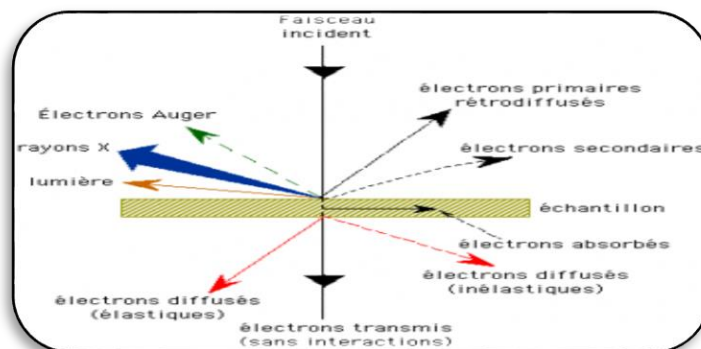


Figure II.23: illustre l'ensemble des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon.[27]

✓ **Les électrons secondaires**

Les électrons secondaires sont créés par le passage d'un électron incident près d'un atome. L'électron incident peut transmettre une partie de son énergie à un électron peu lié de la bande de conduction provoquant ainsi une ionisation par éjection de ce dernier électron. L'énergie cinétique de ce dernier ne peut excéder 50 eV. Chaque électron incident peut créer plusieurs électrons secondaires. Malgré leurs faibles énergies, seuls les électrons secondaires émis proche de la surface (< 10 nm) peuvent s'échapper de l'échantillon et être recueillis par le détecteur. La moindre variation topographique va modifier la quantité d'électrons secondaires collectés.

✓ **Les électrons rétrodiffusés :**

Les électrons rétrodiffusés sont émis lors de la collision entre un électron incident et un atome de l'échantillon. Ce sont des électrons primaires qui ont réagi de façon élastique avec des noyaux d'atomes de l'échantillon. Ils sont dispersés dans toutes les directions avec une faible perte d'énergie. Du fait de leur forte énergie, les électrons rétrodiffusés récupérés peuvent provenir d'une plus grande profondeur que celle des électrons secondaires. Ils ont une sensibilité topographique nettement inférieure. Du fait de leur origine, la quantité d'électrons rétrodiffusés croît avec le numéro atomique des atomes constitutifs de la cible.

II.7.4 Caractérisation structurale Les Rayons (X) DRX

L'émission d'un photon X permet à un atome ionisé sous l'impact du faisceau d'électrons, de revenir à l'état fondamental. Quand un électron d'une couche interne d'un atome a été éjecté, un électron d'une couche plus externe va combler la lacune. La différence d'énergies entre ces deux couches va provoquer l'émission d'un photon X.

Les photons X possèdent une énergie caractéristique propre à chaque élément qui les a émis [26].

Cette technique permet l'identification des phases cristallines d'un solide. Elle permet de suivre l'évolution de la maille élémentaire, de la cristallinité et de la taille des cristallites en fonction des traitements subis par les solides.

L'appareil utilisé est le diffractomètre Brüker D8 Advanced à goniomètre automatique.

L'appareil est équipé, pour la partie émission, d'un tube à anticathode de cuivre dont la longueur d'onde, $K \alpha_1$, est de $1,54056 \text{ \AA}$.



Figure II.24 : Diffractomètre D8 Advance Bruker DMIL Sévices Caractérisation.

II.7.4.1 Principe de fonctionnement :

Le principe du fonctionnement du diffractomètre est basé sur la loi de Bragg :

$$n \lambda = 2d \sin \theta \text{eq.01}$$

Avec n : Ordre de réflexion, λ : Longueur d'onde du rayonnement incident,

d : Distance inter- réticulaire et θ : Angle d'incidence.

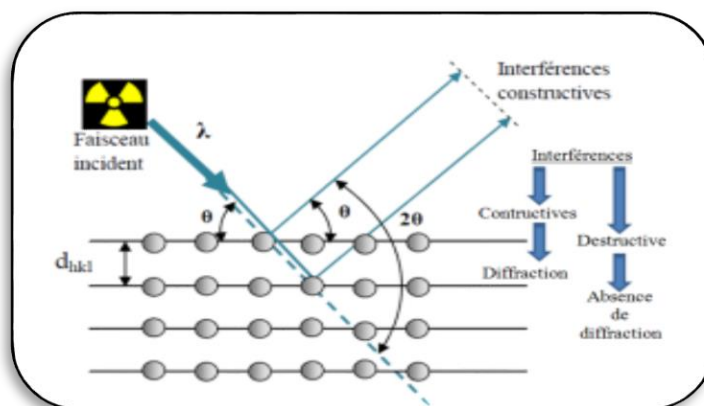


Figure II .25: Schéma représentant le principe de la diffraction des rayons X[27]

II.7.4.2 Détermination de la taille des grains

La taille des grains des différents échantillons a été déterminée tout d'abord à partir des spectres des diffractions. Afin de s'assurer de ces valeurs de taille de grains de nos films, nous avons utilisé la relation de Scherrer:

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \text{eq.02}$$

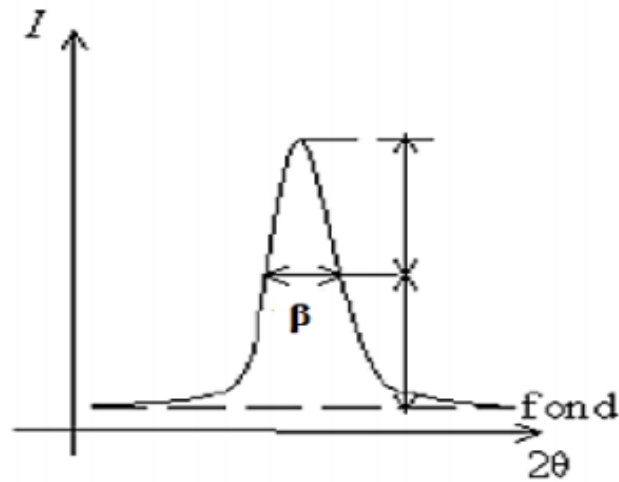
Ou :

D : Taille moyenne des cristallites (taille des grains);

λ : Longueur d'onde de faisceau de rayon X;

θ : l'angle de diffraction

β : La largeur à mi-hauteur des pics les plus intenses



FigureII.26: La définition de β à partir de la courbe de diffraction des rayons X.

Chapitre III

Résultats et Discussion

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux différentes techniques de caractérisation utilisées pour l'étude des dispositifs IDT réalisés sur différents substrats. L'équipement disponible au niveau de la Plateforme MEMS du CDTA nous a permis d'effectuer la plus grande partie des mesures. Pour le reste des mesures, ont était aux niveaux du service caractérisation du CDTA. Les techniques de caractérisation auxquelles nous avons fait appel sont les suivantes :

- Microscopie optique pour observer la qualité des masques les dispositifs IDT réalisés.
- Profilométrie par DIKTAK pour mesurer les distances entre les doigts interdigités et la détermination des épaisseurs de la résine.
- Microscopie électronique à balayage (M.E.B.) pour la caractérisation morphologique des surfaces de L'AlN,
- Diffraction des rayons X pour la caractérisation structurale de L'AlN réalisées sur le Si.
- Microscopie optique pour observer les dispositifs IDT réalisés sur L'AlN.

III.2 Caractérisation Microscopie optique

- **Les masques**

La réalisation des masques est parmi les premières étapes indispensables pour réaliser des dispositifs miniatures, qui sont utilisé dans la technique photolithographie. Pour le transfert des motifs sont utilisés des masques. Les motifs sont dessinés par le logiciel **MATLAB** (dessin assisté par ordinateur) qui sont illustrés dans le tableau III.1 et tableau III.2.

Dans notre travail, nous avons réalisé des masques par impression haute résolution sur des papier transparents (MILARD). pour ce type de masque la résolution d'impression ne permet pas d'aller vers des motifs de quelque micromètre. de ce fait la première étape a été la caractérisation des masques par microscope optique pour visualiser la qualité d'impression et avoir la résolution des motifs imprimables.

Nous avons utilisé un microscope optique avec un objectif d'agrandissement de X10. Après caractérisation par microscopie optique des masques et comparaison entre les paramètres de dessin de masque et les masques réalisés sur le MILARD nous avons constaté que l'impression a été réussie et que les paramètres ont été transférés sur le masque (**Tableau III.1** **Tableau III.2**)

Ces tableaux, présentent la comparaison entre les paramètres des masques théorique et celle transféré sur les masques (réalisation), nous avons constaté que les paramètres ont été transfère avec une erreur de ($\Delta=\pm 0.01\sim 0.02\text{ }\mu\text{m}$) prés.

On conclusion les motifs réalisable avec les masques dans notre cas sont les structures qui ont des espacements et des largeurs supérieure ou égale à $75\text{ }\mu\text{m}$. de ce fait les dispositifs avec cette technique sont les structures qui ont des longueurs d'onde supérieur a $300\mu\text{m}$.

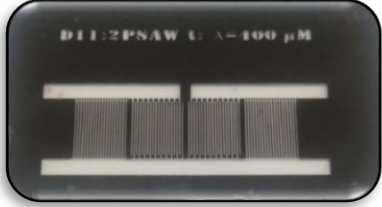
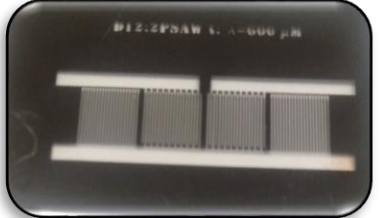
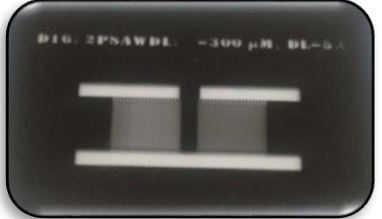
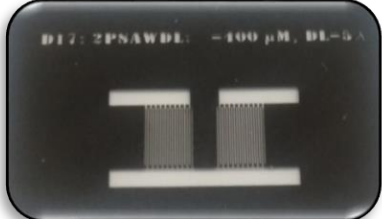
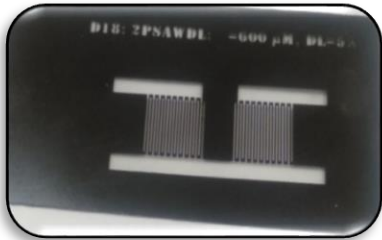
	Dimension pour Réalisation des masques (MATLAB)	Dimension par microscopie Masque réalisée	Masque réalisée
D11 2PSAW $\lambda=400\mu\text{m}$ m	$a = 100\mu\text{m};$ $b = 100\mu\text{m};$ $N_{r_Bragg} = 20$ $L_B = 3*\lambda / 2$ $N_p = 10;$ $W_a = 5\text{mm};$ $D_Delay = \lambda$	$P=101.4\mu\text{m}$ $E=97.7\mu\text{m}$	
D12 2PSAW $\lambda=600\mu\text{m}$ M	$a = 150\mu\text{m}; b = 150\mu\text{m};$ $N_{r_Bragg} = 20$ $L_B = 3*\lambda / 2$ $N_p = 10;$ $W_a = 5\text{mm};$ $D_Delay = \lambda$	$P=151.03\mu\text{m}$ $E=150.39\mu\text{m}$	
D16 2PSAW $\lambda=300\mu\text{m}$ M DL=5 λ	$a = 75\mu\text{m}; b = 75\mu\text{m};$ $N_{r_Bragg} = 1$ $L_B = 3*\lambda / 4$ $N_p = 10;$ $W_a = 5\text{mm};$ $D_Delay = 5\lambda$	$P=68.45\mu\text{m}$ $E=81.2\mu\text{m}$	
D17 2PSAW $\lambda=600\mu\text{m}$ M DL=5 λ	$a = 150\mu\text{m}; b = 150\mu\text{m}$ $N_{r_Bragg} = 1$ $L_B = 3*\lambda / 2$ $N_p = 10;$ $W_a = 5\text{mm}; D_Delay = 5\lambda$	$P=150.5\mu\text{m}$ $E=149.2\mu\text{m}$	
D18 2PSAW $\lambda=400\mu\text{m}$ M DL=5 λ	$a = 100\mu\text{m}; b = 100\mu\text{m};$ $N_{r_Bragg} = 1$ $L_B = 3*\lambda / 2$ $N_p = 10;$ $W_a = 5\text{mm}; D_Delay = 5\lambda$	$P=97.04\mu\text{m}$ $E=105.2\mu\text{m}$	

Tableau III.1: comparaison des paramètres de la réalisation des masques par MATLAB avec la maque réel.

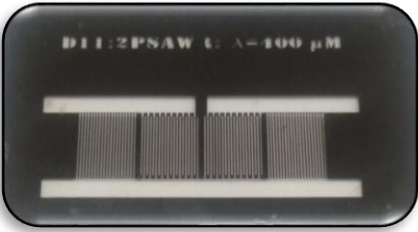
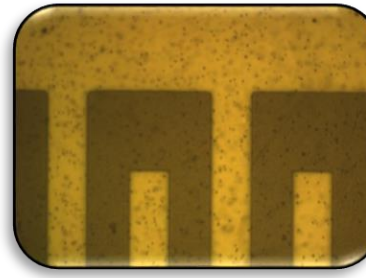
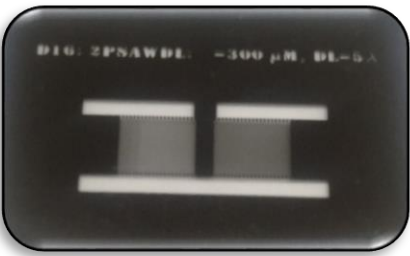
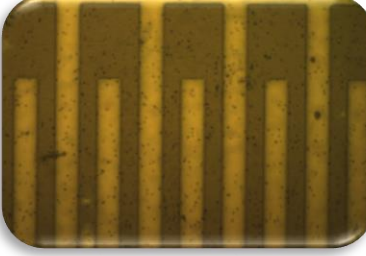
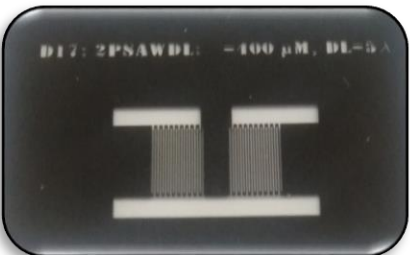
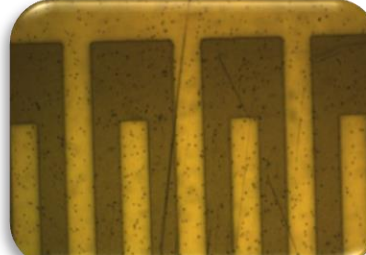
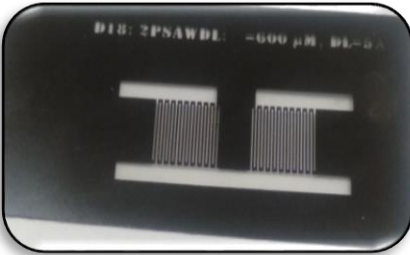
	Masque réalisée	Dimension par microscopie Masque réalisée	Image microscopique Des masques
D11 2PSAW $\lambda=400\mu\text{m}$		P=101.4 μm E=97.7 μm	
D12 2PSAW $\lambda=600\mu\text{m}$		P=151.03 μm E=150.39 μm	
D16 2PSAW $\lambda=300\mu\text{m}$ DL=5 λ		P=68.45 μm E=81.2 μm	
D17 2PSAW $\lambda=600\mu\text{m}$ DL=5 λ		P=150.5 μm E=149.2 μm	
D18 2PSAW $\lambda=400\mu\text{m}$ DL=5 λ		P=97.04 μm E=105.2 μm	

Tableau III.2 : Caractérisation par microscopie optique des masques.

✓ Calcul de l'erreur relative à l'impression

Le tableau III.3, Résume l'erreur de l'impression dans les masques réalisé.

Pour la détermination d'erreur relative nous avons fait appel à l'équation suivante :

$$\Delta = (\text{Dimension réel} / \text{dimension théorique}) + \text{erreur microscope}$$

$$\Delta = \frac{P+E}{a+b} \text{eq.3.1}$$

Nous avons utilisé les démentions théoriques et les démentions réels qui sont présentés dans le tableau III.3.A cette caractérisation nous avons constaté que l'erreur dans l'impression du masque est autour de 0,01. Nous considérant que cette erreur est négligeable et que les masques sont acceptable à la réalisation.

	Dimensionsthéorique (μm)	Dimensions Mesuré (μm)	Erreur Relative
D11	a=100 b=100 λ=400	P=101.4 E=97.7 λ=398.1	$\Delta = 0.02$
D12	a=150 b=150 λ=600	P=151.03 E=150.39 λ=602.84	$\Delta=0.01$
D16	a=75 b=75 λ=300	P=68.45 E=81.2 λ=299.3	$\Delta = 0.01$
D17	a=150 b=150 λ=600	P=150.5 E=149.2 λ=599.4	$\Delta = 0.02$
D18	a=100 b=100 λ=400	P=97.04 E=105.2 λ=404.48	$\Delta = 0.01$

Tableau III.3 : Résumé l'erreur de l'impression dans les masques réalisés.

III.3 Résultats de la réalisation photolithographie :

Une fois le masque réalisé et caractériser nous avons passé au process de réalisation par la photolithographie dans la Plateforme MEMS. Dans ce travail nous avons utilisé deux modèles de résines pour la maîtrise du process, à savoir la résine AZ 5214E et la résine RER500. Ces résines sont utilisées en salle blanche pour la réalisation des motifs micrométriques.

Le tableau suivant représente la réalisation des motifs à partir de modèle de résine AZ 5214E.

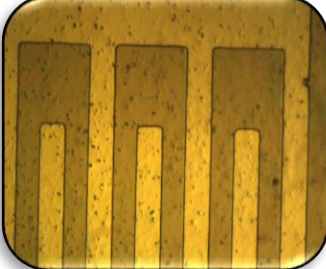
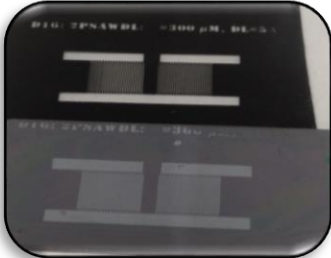
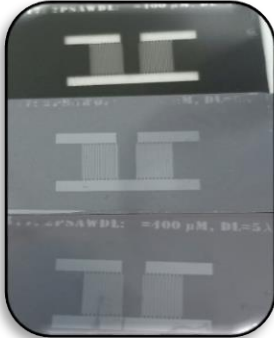
	Transfert du masque sur le Si Résine+ motif du masque	Caractérisation optique Résine+ motif du masque	La reproductibilité
D11 2PSAW $\lambda=400\mu\text{m}$ DL=5 λ			
D16 2PSAW $\lambda=300\mu\text{m}$ DL=5 λ			
D17 2PSAW $\lambda=600\mu\text{m}$ DL=5 λ			

Tableau III.4: Montré le transfères du masque sur le substrat Si avec la résine AZ 5214E.

Nous avons réalisé plusieurs motifs des différentes démonitions et nous avons constaté que le résultat final dépend de plusieurs paramètres : le temps d'insolation, le temps de développement et de l'enrésinement. Ces paramètres influent sur l'allure de motif obtenue il peut y avoir un transfert direct de motif ces les paramètres de process sont optimal tel que illustré sur la figure de la caractérisation optique de échantillon D11 du tableau III.4. Dans le cas de sur insolation et de sur développement sont obtenue des structures érodées. tel que représenté sur l'échantillons D16 du tableau III.4. Ces résultats sont confirmés par la caractérisation profil mètre mécanique décrite dans ce qui suit.

III.4 Caractérisations par profilometrierésinemodèlesAZ 5214

La caractérisation des profils et des épaisseurs des motifs a été réalisée par le profilomètre mécanique DektakII.a. Nous avons illustré les types de profil obtenu sur le tableauIII.5. Dans le cas d'un transfert de masque réussi, tel que représenté sur la figure de la première ligne du tableauIII.5, nous obtenons des marches quadratiques. A l'inverse dans le cas de sur développement nous obtenons des marches érodées.

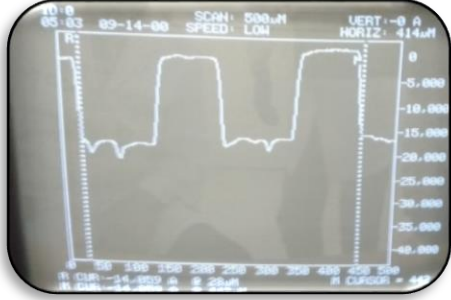
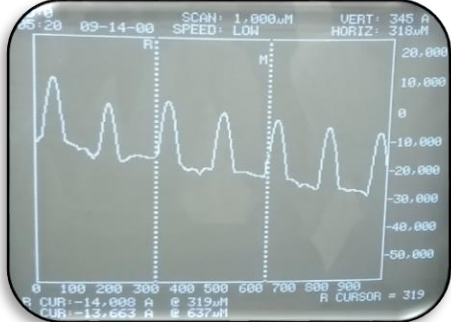
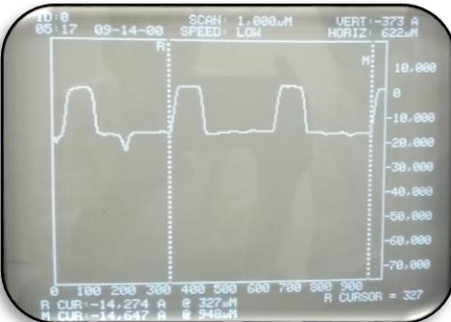
Dimension parprofilometriedektak	Dimension reel(μm)	Dimension DEKTAK(μm)	Remarque
	a=100 b=100 λ =400	P=104 E=104 λ =410	Transfert du masque réussi a 100%
	a=75 b=75 λ =300	P=60 E=96 λ =310	Surdéveloppement Transfert du masque réussi a 70%
	a=150 b=150 λ =600	P=111 E=200 λ =622	Transfert du masque réussi a 100%

Tableau III.5: Récapitule le transfères du masque sur la résine et les épaisseurs mesuré.



Figure III.2 Masque utilisé.

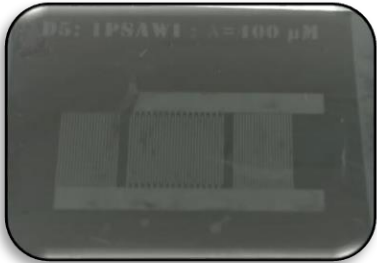
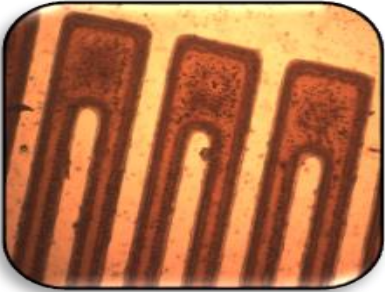
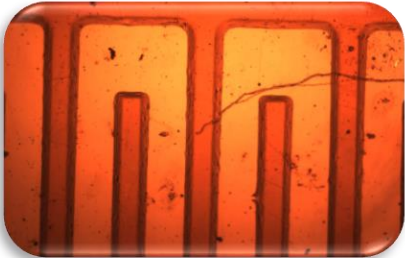
	Le dispositif	<i>résines</i> AZ 5214E
LIFT OFF		
Gravure		

Tableau III.6 :Réalisation des dispositifs pour le Lift Off et la GRAVURE.

Grace à la maitrise de la technique de photolithographie nous avons pu réaliser différents échantillons sur différents supports pour les deux cas de révélation de la résine,

- **Lift Off** : retrait de la résine dans les parties insolées est comblé avec l'Al.
- **Gravure** : arrachement de la matière en gardant le motif insolé.

III.5 lithographie avec résine HIPR 6512:

La résine HIPR 6512 est une résine utilisée par le process de la micro fabrication dans les salles blanches. Nous pouvons dire que notre process et maîtrise a 100% pour les différentes résine qui existe pour la réalisation des dispositifs miniaturiser. Le tableau III.7 résume les différentes caractérisations des motifs réalisés avec cette résine. Nous avons obtenu des motifs avec des profils de formes satisfaisantes. La résolution spatiale des motifs est limitée par le masque de type millard, celle-ci peut être améliorée en utilisant les masques de salle blanche.

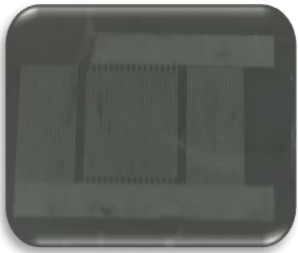
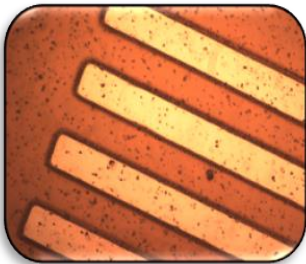
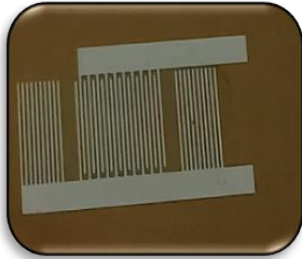
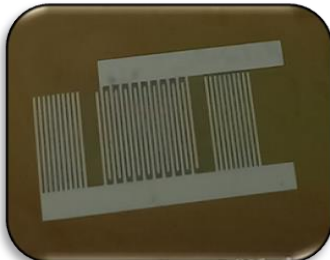
	Dispositif	Visualisation optique	Visualisation par diktak
Visualisation de la largeur des doigts			
Visualisation de l'espacement (Echantillon 1)			
Visualisation de l'épaisseur de la résine (Echantillon 2)			

Tableau III.7 : visualisation des différents paramètres de dispositif

Sur le tableau ci-dessous se représenté déférant motif réalisé dans ce travail .

La reproductibilité	Visualisation optique	Visualisation par diktak
	 	 

Tableau III.8 : La reproductibilité de dispositif

III.6 Metalisation

- ✓ Depots des couches minces d'Al sur les substrat en resiner

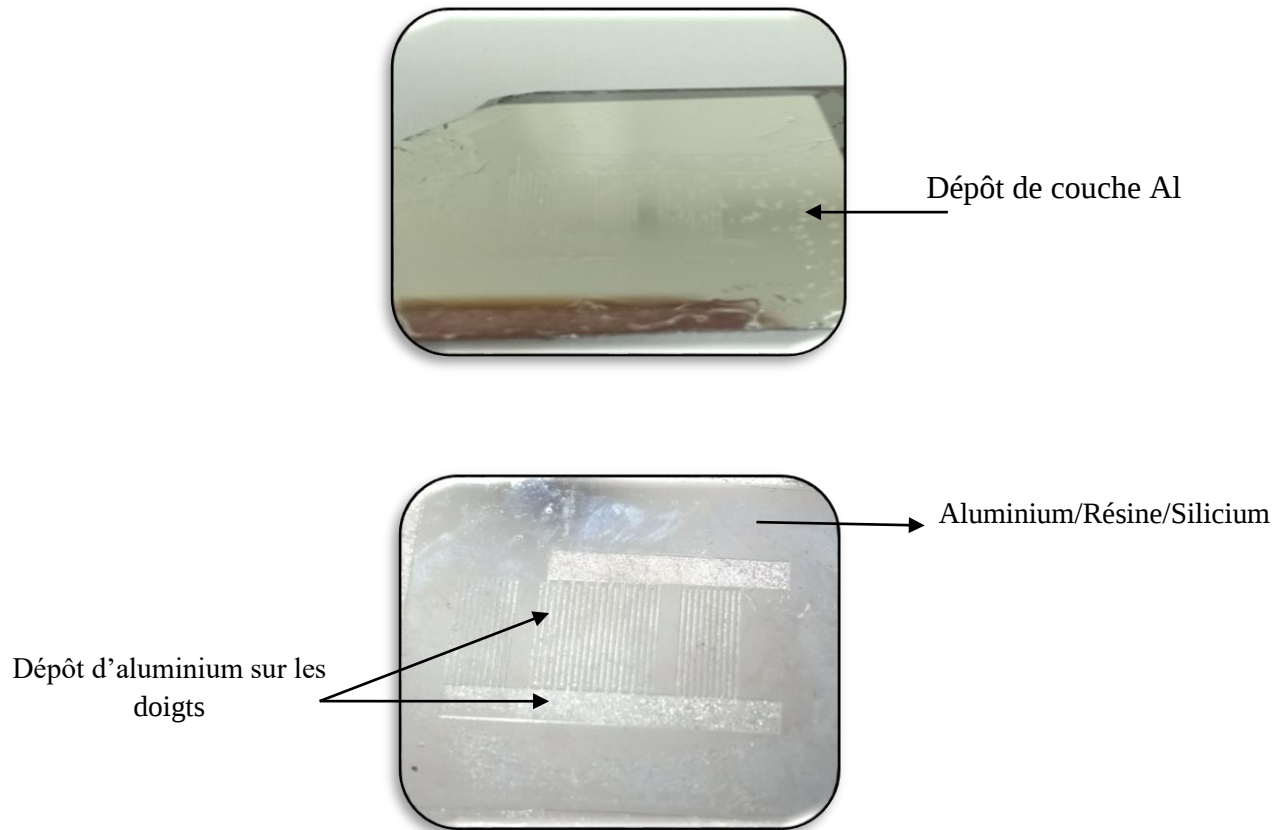


Figure III.3: Depots de l'Al par Evaporation thermique.

Nous avons procéder au depots de'AL par l'évaporation thermique, les echonltillon realiser dans **la FigureIII.3** Nous avons utiliser deux motifs des IDT, que nous montrons sur **la Figure III.4**Image reel des masque utiliser.

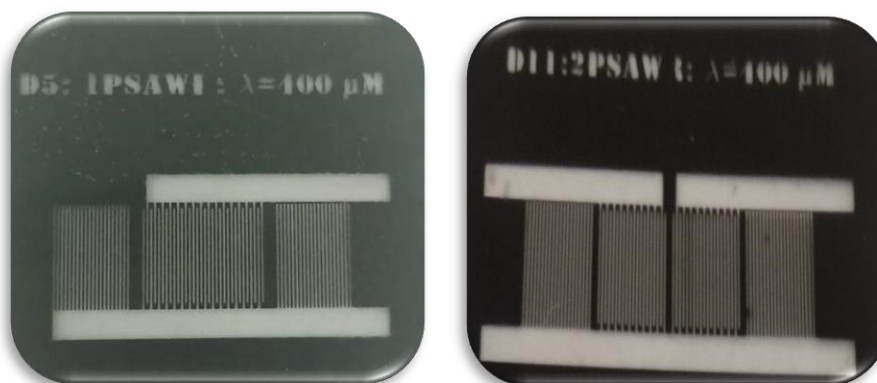


Figure III.4Image reel des masque utiliser.

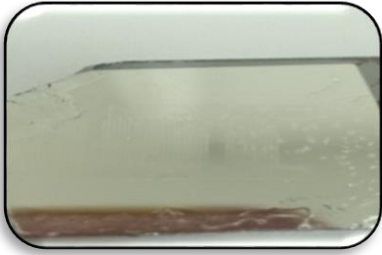
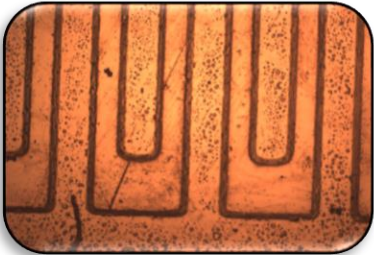
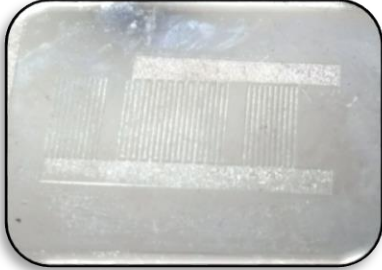
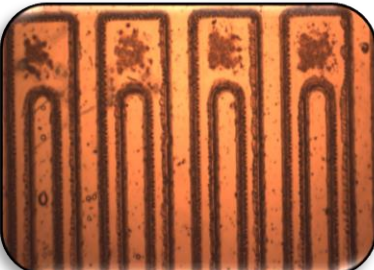
Epaisseur	Echantillon	Visualisation optique
80µm		
150µm		

Tableau III.9 :la métallisation.

III.7 Réalisations des IDT sur l'AlN

✓ Caractérisation morphologique et structurale de la couche AlN sur Si

Le wafer qui a été utilisé dans notre travail est un wafer de 500 nm d'AlN sur un substrat de Si, de l'université de Stand Ford.



Figure III.5: Image du Wafer AlN sur Si

✓ Découpage du wafer

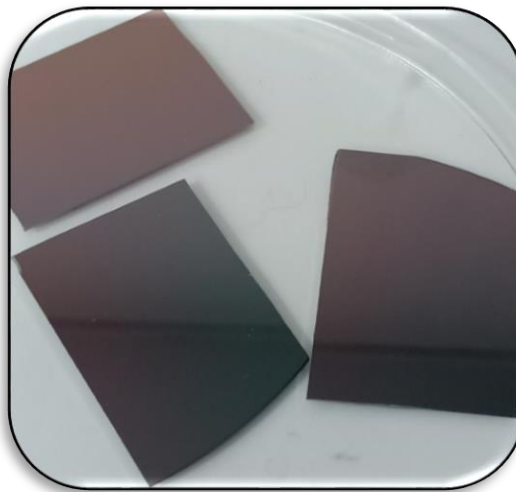


Figure III.6 : Découpage de substrat AlN sur Si

III-7-1 Caractérisations morphologiques par MEB

Nous avons utilisé le microscope électronique à balayage MEB, pour observer les surfaces et les tranches des couches ALN réalisées sur le Silicium. Cet appareil nous renseignera sur la rugosité de surface, la morphologie des couches (denses ou peu denses) et sur la structure (aspect colonnaire ou pas).

La Figure **III.7** montre la structure colonnaire de la couche ALN observée par le microscope électronique à balayage (MEB), cette couche est réalisée sur le Silicium par la pulvérisation cathodique RF à l'université de stunforde, l'épaisseur mesurée par le MEB 500 nm, avec une homogénéité dans toute la direction.

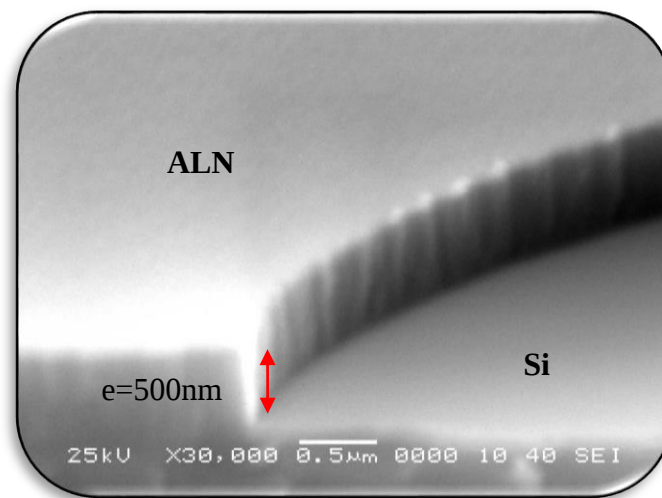


Figure III.7 Image SEM montrant la morphologie des couches minces ALN sur Si.

III.8 Diffraction des rayons X DRX

✓ Propriétés structurales diffraction des rayons X

Les mesures ont été effectuées par un diffractomètre Bruker D8. Les rayons X sont produits à partir d'une source de radiation $\text{CuK}\alpha$, ayant une longueur d'onde de $1,5406 \text{ \AA}$.

La connaissance exacte de la structure cristalline des couches est liée à la disponibilité d'éléments de caractérisation structurale nécessaires tel que les fichiers *A.S.T.M* informatisés pour une identification automatique ou bien les cartes *A.S.T.M.* ou *J.C.P.D.S.* pour une identification manuelle.

La figure **III.8** : Représente les spectres de diffraction des rayons X (DRX) d'échantillon d'ALN/Si pour la détermination des pics correspondant à l'AlN nous avons utilisé la carte J.C.P.D.S.75-1620.

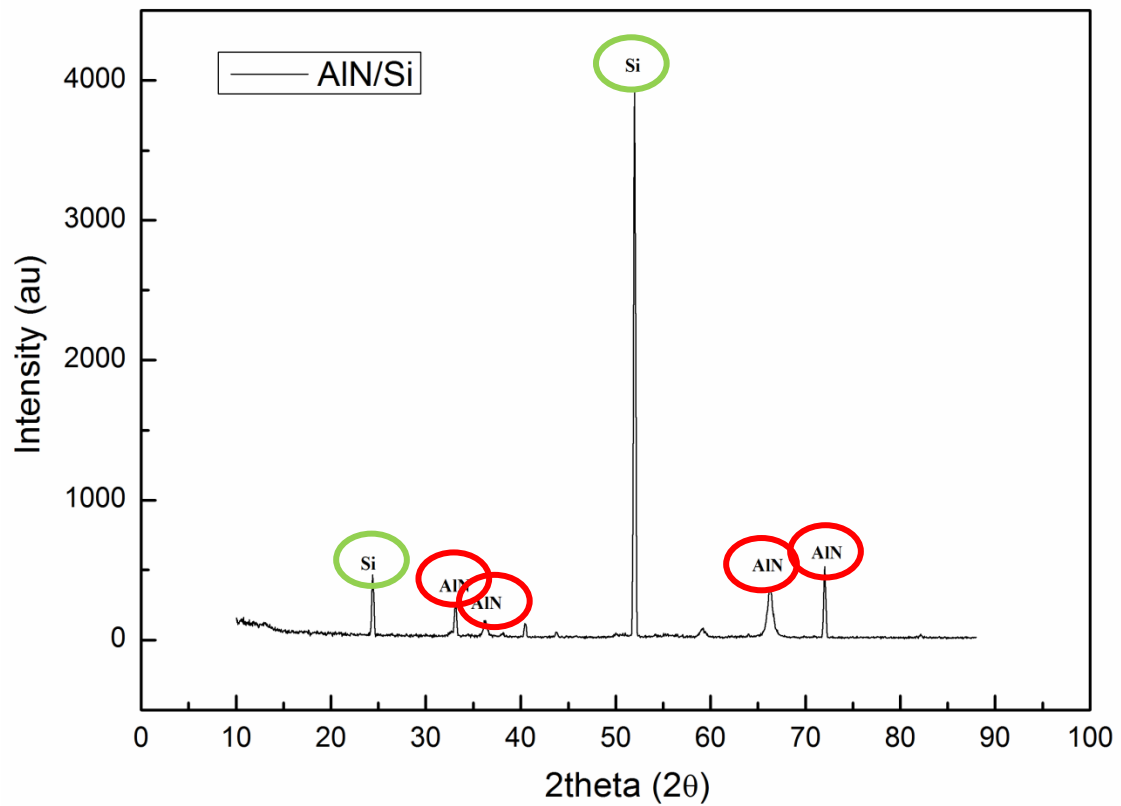


Figure III.8 : Spectres de diffraction des rayons X des couches minces AlN sur Si.

La DRX nous a permis de déterminer les pic représentant du matériau AlN.

III.9 Partie lithographie de L'AlN

La dernière étape dans notre travail est la réalisation des IDT sur AlN qui est l'objectif principale dans ce travail après avoir bien maîtrisé le process on utilisant les deux résines le tableau ce dessus résume la réussite de process sur AlN.

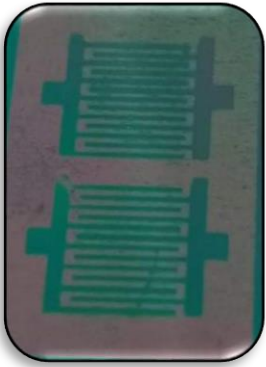
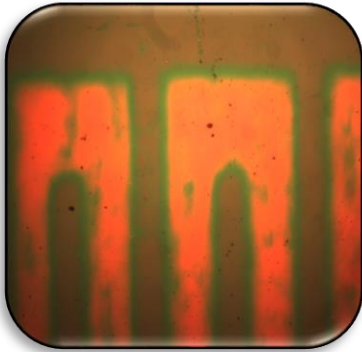
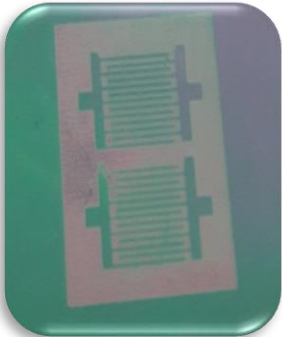
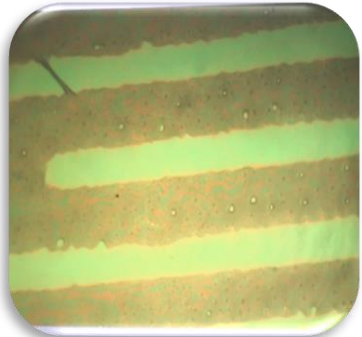
	Dispositifs	Visualisation oblique	Caractérisation par Diktak
Réalisation des IDT sur AlN			
Réalisation des IDT sur AlN			

Tableau III.10 : Caractérisation de dispositif AlN sur Si

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé les échantillons réalisés par la technique photolithographie de la plateforme MEMS, La caractérisation nous a montré que nous avons obtenue des IDT fins avec des largeurs bien définis et d'espacement micrométrique maîtrisé sur différents support tel que le Silicium, Silicium/AlN. Ainsi la métallisation a été effectuée pour libérer les IDT métalliques et de passer à la caractérisation électrique.

Nous avons procédé à des caractérisations morphologiques et structurales pour les Wafer de Silicium/AlN pour confirmer que nous avons de l'AlN déposé sur Si, ainsi nous avons procédé à la réalisation du transfert du masque des IDT choisi sur le support.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale & Perspective

Dans ce travail, les objectifs étaient réalisation des IDT sur AlN c'est une tâche dans le projet intitulé : « **Conception et réalisation d'un capteur de température à base de SAW compatible avec la technologie CMOS 1µm (Acronyme : CT-SAW/CMOS-1µm)** », projet Socioéconomique inscrits dans l'équipe MEMS&SENSORS.

Les objectifs que nous avons visés au début de ce travail, ont été majoritairement atteints, à savoir :

- l'étude et le développement des procédés technologiques permettant la réalisation des IDT sur différent support,
- réalisation et conception des masques ;
- caractérisations des masques après impression,
- reproductibilité des motifs choisis, métallisations par évaporation thermique.

Perspectives

- *Libération des IDT avec Al,*
- *Caractérisation Fréquentiel du signal,*
- *Réalisation du Capteur de Température SAW.*

Références

Références

- [1] James A. Samson, David L. Ederer, «Vacuum ultraviolet spectroscopy», ELSEVIER (1999).
- [2] Julian W. Gardner, Vijay K. Varadanet Osama O. Awadelkarim, «Microsensors, MEMS, and Smart Devices», JOHN WILEY & SONS, LTD E, USA (2002).
- [3] B. Assouar, «Etude de dispositifs à ondes acoustiques de surface (SAW) a structure multicouche nitrure d'aluminium / Diamant: Croissance de matériaux en couches minces et technologie de réalisation», thèse de doctorat, université Henry Pocard, Nancy 1, 2003.
- [4] John N. Helbert, «Handbook of VLSI microlithography: Principles, technology, and applications», Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A (2001).
- [5] F. Boutaiba, «Réalisation d'un transducteur piézoélectrique à base de couches minces d'oxydes de Zinc dopée cuivre», mémoire de magister, université des Sciences et Technologie" Mohamed Boudiaf" d'Oran, 2005
- [6] Gary S. May, Costas J. Spanos, «Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control», A JOHN WILEY & SONS, INC, PUBLICATION (2006).
- [7] Dutheil, P. (2012), Films minces et multicouches de matériaux piézoélectriques : synthèse par ablation laser ; caractérisation microstructurale et intégration dans les dispositifs SAW.
- [8] Techniques-ingénieur , photolithographie : définition et propriétés.
- [9] Christophe Huber, «Synthèse et caractérisation de nouveaux matériaux ferroélectriques accordables pour applications hyperfréquences», thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2003.
- [10] Tareq, B.G. (2016). Etude et simulation des paramètres géométriques d'un capteur à onde acoustique de surface (SAW) sur environnement Comsol-Multiphysique.
- [12] Sanogo, Y. (2012). Conception et fabrication de capteurs et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la santé et de l'environnement.
- [13] Nicolay, P. (2007). les capteurs à ondes élastiques de surface. Application pour la mesure des basses pressions et des hautes températures.
- [14] Amina-Zahia, F.M. (2009). Dépôt par pulvérisation magnétron de couches minces de nitrure d'aluminium à axe C incliné en vue de la réalisation des dispositifs à ondes acoustiques vibrant en mode de cisaillement.
- [15] Marc Duquennoy, O.R. (2012). Développement de capteurs interdigités sur substrat piézoélectrique de type PZT pour la génération de sondes de surfaces en haute fréquences.

Références

- [16] Libor Rufer, « Transducteurs électroacoustiques et ultrasonores : Des macro- aux micro-systèmes », thèse de doctorat, université Joseph Fourier, Grenoble, 2007.
- [17] Bouchama Hakim, « Etude des effets piezo-acousto-opto-électroniques dans les nanostructures: Applications a la détection des ondes acoustiques de surface », mémoire de magister, université d'Oran, 2007.
- [18] R. Lanz, M-A. Dubois, P. Muralt, Proceeding of IEEE Ultrasonics 2001, 843
- [19] M. B. Assouar, O. Elmazria, M. El Hakiki, P. Alnot, Journal of Vacuum Science and Technology B. 22 (2004) 1717
- [20] F. Martin, M.-E. Jan, B. Belgacem, M.-A. Dubois, P. Muralt, Thin Solid Films 514 (2006) 341
- [22] A. CLAUDEL . ELABORATION ET CARACTERISATION DE COUCHES DE NITRURE D'ALUMINIUM AIN PAR CVD HAUTE TEMPERATURE EN CHIMIE CHLOREE . INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE
- [23] S. FELTANE, M. ROUMILI , mémoire de master, « Élaboration et caractérisations des couches minces d'oxyde de zinc déposées par voies chimique et physique ». Université Abderrahmane Mira – Béjaia, 2016.
- [24] K.H. Behrndt. Journal of Vacuum Science and Technology, 2 (1965) 63.
- [25] J.A. Dobrowolski, M. RAanger et R.L. Wilkinson : Measurements of angular evaporation characteristics of sources. Journal of Vacuum Science et Technology A Vacuum, Surfaces, and Films, 1 (1983) 1403.
- [26] J.C. Manificier, Thin metallic oxides as transparent conductors, Thin Solid Films, 90(3), (1982) 297.
- [27] B. KHALI, K. MEGUETAOUI Etude des couches minces des oxydes ZnO et SnO₂ sur le verre et quartz pour application a la détection des gaz .université de Blida ,2017.

