



HAL
open science

Mise au point et qualification de couches métalliques pour les procédés de câblage pour la microélectronique

David Pontacq

► **To cite this version:**

David Pontacq. Mise au point et qualification de couches métalliques pour les procédés de câblage pour la microélectronique. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017. hal-01546912

HAL Id: hal-01546912

<https://laas.hal.science/hal-01546912>

Submitted on 26 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

David PONTACQ

DUT Mesures Physiques

Spécialité TI

IUT A Université Paul Sabatier – Toulouse III

RAPPORT DE STAGE

Mise au point et qualification de couches métalliques pour les procédés de câblage pour la microélectronique



LAAS – CNRS
7 Avenue du Colonel Roche
31400 Toulouse
Tel : [05 61 33 62 00](tel:0561336200)

Tuteur dans l'entreprise : CHARLOT Samuel

Enseignant tuteur : AGEZ Gonzague

Stage effectué du 03 avril au 23 juin 2017

LAAS-CNRS



Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il me semble évident de remercier toutes les personnes qui ont participé de différentes façons à la réussite de mon stage.

Je tiens, dans un premier temps, à remercier mon tuteur de stage Monsieur Samuel CHARLOT, ingénieur d'étude au sein du service TEAM du LAAS, pour son accueil, ses conseils ainsi que pour le temps qu'il m'a consacré pour l'avancement de mon stage et pour m'avoir fait découvrir le monde de la recherche dans les meilleures conditions possibles.

Mes remerciements vont ensuite à Monsieur Gonzague AGEZ, mon tuteur de stage de l'IUT pour l'intérêt qu'il a porté au bon déroulement de ce stage ainsi que pour sa disponibilité et ses conseils.

Je souhaite également remercier Messieurs Guillaume LIBAUDE et Ludovic SALVAGNAC pour l'aide qu'ils m'ont apportée en salle blanche ainsi que pour leur travail qui était une étape essentielle au bon déroulement de mon stage.

Enfin, je remercie tous les membres du service TEAM pour les conseils qu'ils ont pu m'apporter, l'accueil qu'ils m'ont réservé ainsi que leur sympathie tout au long de ce stage.

Résumé

Ce rapport expose les activités que j'ai réalisées au cours de mon stage pour la validation du diplôme DUT Mesures Physiques. Lors de mon stage j'ai intégré le Service TEAM au sein du LAAS-CNRS (Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes) durant 12 semaines du 3 avril au 23 juin 2017.

Mon projet consistait à caractériser la résistance mécanique de micro-fils de câblage électrique sur différentes couches métalliques d'un substrat de silicium et d'établir une base de donnée. Pour cela, j'ai réalisé toutes les étapes technologiques qui vont du nettoyage à la caractérisation mécanique en passant par les étapes de photolithographie, de métallisation et de gravure. Une fois ces étapes réalisées, j'ai procédé à la micro-soudure de fils d'or ou d'aluminium sur des pistes métalliques et fait des tests de traction sur ces fils pour caractériser la fiabilité des contacts.

Au cours de ce projet, j'ai donc été formé puis j'ai travaillé sur divers équipements dédiés à l'assemblage, la caractérisation, la photolithographie et la métrologie dans la salle blanche de 1500m² de type microélectronique du LAAS. Dans un premier temps, j'ai étudié l'impact des procédés de fabrication des pistes électriques ainsi que leurs épaisseurs sur la qualité des soudures, puis, dans un second temps, l'impact des différents procédés de métallisation.

Thème principal : Matériaux

Mots clés : Tests et essais, Électronique

Abstract

This report describes the activities I have done during my final year internship in the Physical Measurements University Institute of Technologie. During this intership, I integrated the team TEAM(Systems analysis and architecture laboratory) for 12 weeks from April 3rd to June 23th, 2017.

My project consisted in characterizing the electrical micro-wires mecanic resistance on different metal layers of silicium's substrates to set up a database. In order to do this, I accomplished every technological steps from cleaning to characterization by way of the photolithography, the metallisation and the engraving. After that I made gold or aluminium micro-welds on metalic tracks and I did pull tests on the welds to characterize the trustworthiness of electric contacts.

During this project, I was train on many equipments which were dedicated to assembly, characterization, photolithography, and metrology in the microelectronic clean room of the LAAS. Firstly I considered the influence of the manufacturing process of metallic tracks as well as the influence of thickness on welds quality, then, in a second time, the influence of differents metallisation process.

main topic : Materials

Key words : Tests, Electronic

Sommaire

INTRODUCTION.....	2
CONTEXTE DU STAGE.....	3
1. Présentation du CNRS.....	3
2. Présentation du LAAS-CNRS.....	3
3. Présentation du Service TEAM.....	3
DÉFINITION DU SUJET STAGE.....	4
TRAVAIL RÉALISÉ.....	5
1. Procédé de Nettoyage.....	5
2. Deux méthodes utilisées.....	6
a) Technique additive	6
b) Technique de soustraction.....	7
3. Les étapes.....	8
a) La photolithographie.....	8
b) La métallisation.....	11
c) La gravure chimique.....	15
4. Câblage microélectronique.....	16
5. Caractérisation de la résistance des soudures des micro-fils...18	
RÉSULTATS OBTENUS.....	19
CONCLUSION.....	21
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	22
BIBLIOGRAPHIE.....	23
ANNEXES.....	24

Introduction

Dans le cadre de ma formation en IUT Mesures Physiques, la deuxième année se termine par un stage en entreprise d'une durée minimum de 10 semaines afin de valider le diplôme de technicien supérieur.

Mon stage s'est déroulé au laboratoire du LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes) au sein du service TEAM. Le service est divisé en plusieurs zones qui assurent le support technologique aux activités de recherche pour le prototypage de micro et nano composants. Il est en charge du fonctionnement et du développement de la plate-forme de Micro et Nano Technologies qui met en commun l'ensemble des moyens de fabrication du laboratoire dans ce domaine.

Le projet auquel j'ai participé émanait de 2 zones distinctes que sont l'assemblage et la métallisation. Le but étant de créer une base de données référençant la qualité des micro-soudures en fonction des différentes métallisations et de leurs différentes épaisseurs. En effet, afin de caractériser au mieux les composants créés au sein de la salle blanche il est nécessaire de s'assurer de leurs bonnes connexions électriques. Pour cela, il existe des normes indiquant les valeurs théoriques minimum de résistance des fils de soudure, qu'ils soient d'or ou d'aluminium. La norme IPC-TM-650 montre que pour un fil de 25 μm de diamètre comme ceux utilisés au LAAS, la force minimum d'arrachement est de 1,5 à 3 gf (Gramme Force). Ces valeurs permettent d'avoir une idée des résultats à obtenir lors des tests.

Pour réaliser ces tests, j'ai donc réalisé un processus permettant d'étudier l'influence du lift off et de la gravure ainsi que l'influence d'un post recuit sur la résistance mécanique des soudures. Par la suite, j'ai étudié l'influence des méthodes de dépôts et des machines utilisées sur la résistance des soudures.

Ce rapport s'articulera en trois parties. La première présentera brièvement le CNRS et le LAAS, dans leur globalité, puis plus précisément le service TEAM. La seconde partie portera sur les différentes tâches réalisées ainsi que les problématiques qui y sont rattachées. Enfin, je présenterai les résultats obtenus lors de ce travail.

Contexte du stage

1) [Le CNRS](#)

Le Centre national de la recherche scientifique est un organisme public de recherche (Établissement public à caractère scientifique et technologique).

Il mène des recherches dans l'ensemble des domaines scientifiques et technologiques comme les mathématiques, la physique, la chimie, les sciences du vivant...

Le CNRS exerce donc son activité dans tous les champs de la connaissance, en s'appuyant sur plus de 1100 unités de recherche et de service.

2) [Le Laboratoire du LAAS](#)

Le laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes est une unité propre du CNRS. Situé à Toulouse, ce laboratoire mène des recherches dans quatre disciplines : Informatique, Robotique, Automatique et Micro et nano systèmes.



Figure 1 : Batiment Jean LAGASSE du LAAS

Le LAAS possède une salle blanche de 1500m² qui est compartimenté en 13 zones. Chacune d'elle est spécialisée dans une technologie particulière.

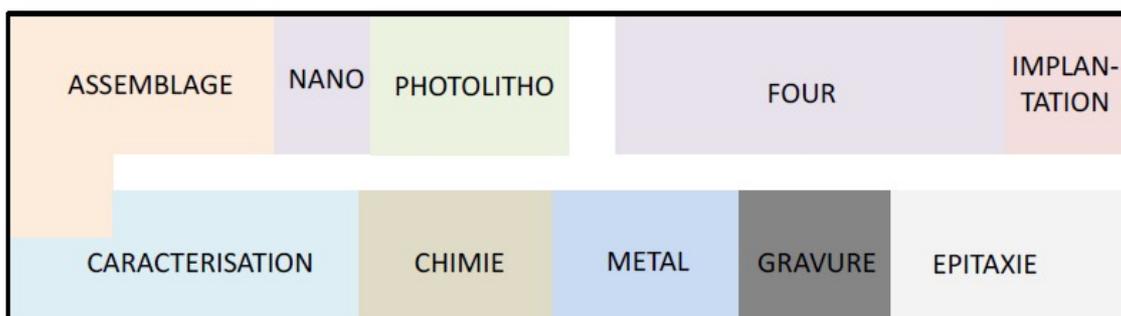


Figure 2 : Répartition des zones de la salle blanche

3) [Le Service TEAM](#)

Le service TEAM, ou Techniques et Équipements Appliqués à la Microélectronique, est le service chargé de la gestion et du fonctionnement de la salle blanche du LAAS, ainsi que d'une grande partie des développements technologiques qui y sont effectués. Chaque membre du service intervient dans des zones particulières de la plate-forme technologique. Dans ces zones, ils veillent à la gestion du matériel, sa bonne utilisation, et à la formation des utilisateurs. Ils jouent également un rôle de coordinateurs de projets entre différentes zones.

Définition du sujet de stage

Dans le cadre d'un projet visant à caractériser la résistance mécanique de micro-fils de câblage électrique en fonction des techniques de dépôt et des conditions opératoires, plusieurs missions m'ont été attribuées.

Dans un premier temps, j'ai dû mettre au point un procédé de nettoyage pour les wafers de silicium qui sont des disques assez fins de matériaux semi-conducteurs. Ces microstructures sont une composante majeure dans la fabrication des circuits intégrés, des transistors, des semi-conducteurs de puissance ou des MEMS (systèmes micro électromécaniques).

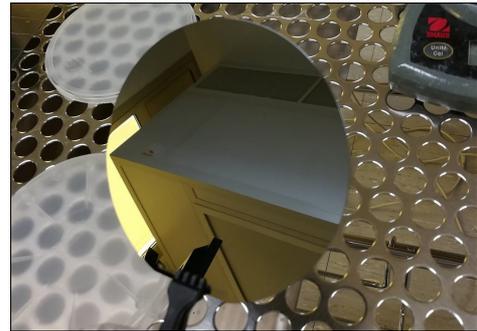


Figure 3 : Wafer de silicium vierge

Le but étant de caractériser la résistance des micro-fils de soudures afin de s'assurer du bon fonctionnement du composant réalisé, plusieurs paramètres ont été étudiés. L'épaisseur des métallisations, les procédés de réalisation des métallisations dans un premier temps, l'appareillage et les techniques de métallisation dans un second temps.

L'épaisseur des métallisations à été définie selon le tableau ci-dessous et correspondent aux demandent classiques:

Titane-or (nm)	Chrome-or (nm)	Aluminium (nm)
50/200	50/200	200
50/150	50/150	100
30/150	30/150	100
20/150	20/150	100

Figure 4 : Epaisseur des métaux à étudier (nm)

Les procédés de fabrication des wafers de test varient selon deux techniques distinctes: le lift off et la gravure chimique (recuit ou non recuit dans les deux cas). Les appareillages de métallisation de la salle blanche pouvaient effectuer deux types de techniques, la métallisation par évaporation ou par pulvérisation (Sputtering).

A la fin du processus de fabrication des wafers de test, j'ai réaliser des micro-soudures sur les plots métalliques créés dans le but de caractériser leurs résistances mécaniques sur une machine de test en arrachement par traction. Ce test permet notamment de déterminer le pic de force nécessaire à la rupture de chaque soudure ainsi que l'endroit et la manière dont la soudure casse. Toutes ces données ont ensuite été traitées pour l'obtention d'une base de données référençant la qualité des soudures en fonction de tous les paramètres précédemment évoqués.

Travail réalisé

2) Procédé de Nettoyage

Le nettoyage des wafers est une étape clé du processus de fabrication des micros et nano-systèmes électroniques. En effet, la surface du silicium présente de grandes affinités chimiques, il est donc difficile d'obtenir un état de surface propre.

Pour veiller à la propreté des wafers dans un souci de répétabilité des tests, j'ai procédé à un protocole de nettoyage qui est représenté schématiquement ci-dessous :



Figure 5 : Schéma du procédé de nettoyage

- 1er étape : Bac piranha

Plonger le wafer dans un bac de piranha durant deux minutes à une température de 100°C. Le piranha est un mélange composé d'acide sulfurique H_2SO_4 (ici à 96%) et d'eau oxygénée H_2O_2 (30%) dans des proportions identiques (50/50). La réaction produite lors du mélange de ces deux liquides produit une réaction exothermique, il se forme alors de l'acide peroxy-sulfurique. Celui-ci a pour effet de nettoyer les résidus organiques présents sur le substrat de silicium.

- Rinçage au bac QDR :

Le bac QDR est un bac rempli d'eau désionisée qui effectue plusieurs cycles de rinçage du wafer en mesurant sa résistivité.

- 2eme étape : Bac HF

L'acide fluorhydrique (HF) est un réactif important dans les procédés de purification des substrats de silicium car il a pour effet d'éliminer les oxydes présents à sa surface (il peut également être utilisé pour attaquer le verre pour d'autres applications en salle blanche).

Le HF utilisé en salle est concentré à 50%, c'est un acide particulièrement dangereux qui nécessite une grande attention ainsi que des précautions supplémentaires quand il est utilisé (double paire de gants, manchettes, masque de protection) .

- 3eme étape : Rinçage au bac QDR et séchage

Ce dernier rinçage a pour objectif d'éliminer toute trace de HF réduisant ainsi les risques de contact avec l'opérateur. Le séchage s'effectue à la soufflette d'azote (N_2) pour enlever l'eau due au rinçage et terminer le nettoyage.

A la fin du nettoyage, il est important de vérifier visuellement la propreté du wafer et ainsi s'assurer qu'aucune grosse poussière ou autre polluant n'est resté sur sa surface.

2) Deux méthodes utilisées

a) Technique additive

Le lift-off est un procédé de création de structures d'un matériau cible sur la surface d'un substrat (ici le wafers de silicium). On réalise un masque en résine avant de déposer le métal sur la totalité du substrat. En disparaissant à l'aide d'un agent d'attaque, la résine élimine le métal qui a été déposé sur sa surface, laissant derrière elle les motifs métalliques recherchés.

- *Avantages du lift off*

- Le lift off est une alternative peu coûteuse à la gravure dans un contexte de recherche.

- Le lift off peut être appliqué dans les cas où une gravure directe de matériaux de structure aurait des effets indésirables sur la couche d'dessous.

- *Inconvénients du lift off*

- *La rétention* : Si ce problème se produit lors du lift off, les parties indésirables de la couche métallique resteront sur la plaquette. L'origine de ce problème provient de la dissolution partielle de la résine. La métallisation indésirable située au dessus de la résine ne peut donc pas se décoller correctement

- *La redéposition* : Au cours du processus de décollage, il est possible que des particules de métal se rattachent à la surface, à un endroit aléatoire. Il est très difficile d'enlever ces particules après séchage du wafer.

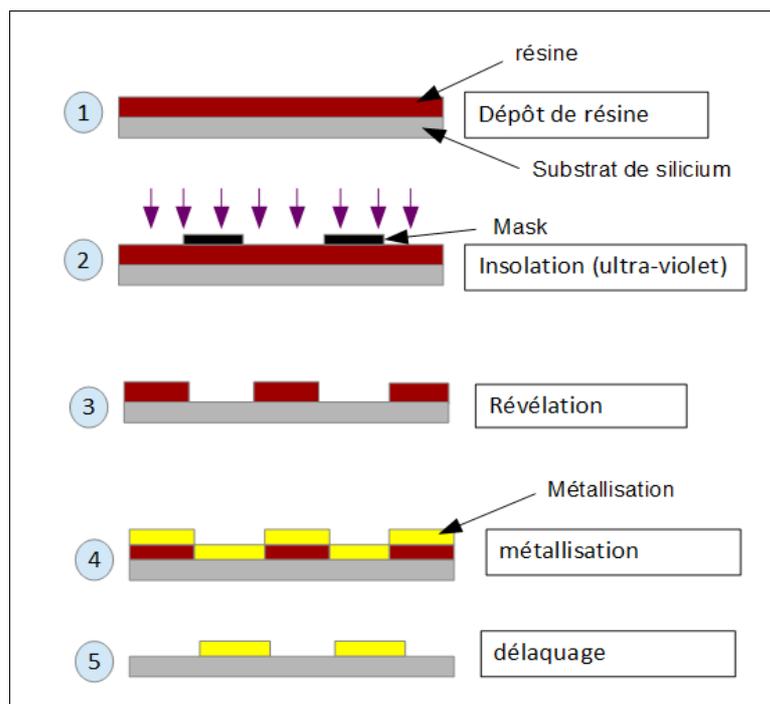


Figure 6 : Résumé schématique d'un procédé de lift-off
(à noter que dans cet exemple, la résine est négative)

a) Technique soustractive

Il existe plusieurs types de gravures Relevant de la technique soustractive, chacune ayant ses propriétés, ses avantages et ses inconvénients. Les différents types de gravures peuvent être classés en deux grandes familles: les gravures « chimiques » et les gravures « physiques ».

La méthode de gravure chimique consiste à plonger le substrat dans une solution qui va attaquer chimiquement sa surface. Pour ce faire, il faudra au préalable protéger les zones que l'on veut préserver par un masque de résine. La solution utilisée pour graver le substrat doit être choisie avec soin car elle ne doit réagir qu'avec le matériau à éliminer. La gravure chimique est relativement simple à mettre en œuvre. A l'issue du procédé, un rinçage à l'eau désionisée ainsi qu'un séchage (centrifugeuse ou soufflage d'azote) sur le wafer sera nécessaire.

Avantages :

- Elle est relativement facile à mettre en œuvre, et peut être facilement industrialisée.
- Le taux de gravure est particulièrement élevé, cela permet d'éviter de détruire la couche protectrice et de ne graver que les zones souhaitées.
- Elle présente une bonne sélectivité des matériaux:

Dans le cas des substrats composés de différentes couches, ce qui est souvent le cas, une gravure chimique aura tendance à ne réagir qu'avec certaines couches. Par exemple, dans le cadre de mon projet, le substrat pouvait être composé d'une couche de titane et d'une couche d'or. Le mélange $Ki + I_2$ aura tendance à n'attaquer que la couche d'or et l'acide fluorhydrique, que celle de titane.

Inconvénients :

Ce procédé de gravure est fortement isotrope, cela signifie que l'acide va attaquer le substrat dans toutes les directions, donnant un profil de gravure presque semi-sphérique. Cette isotropie provoque des problèmes à très petite échelle (<50 nm). Si les zones à graver sont trop proches les unes des autres, il est courant que ces zones soient gravées alors qu'elles ne devraient pas l'être. De plus, cette méthode nécessite l'utilisation de produits dangereux (ex : acide fluorhydrique).

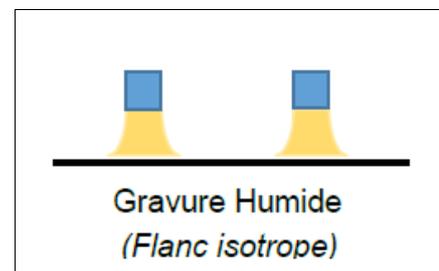


Figure 7 : Gravure humide

Les gravures physiques (ou sèches) ont été développées pour pallier ce problème d'isotropie. Cette technique repose pour l'essentiel sur le bombardement d'ions sur la surface à graver. Ces ions sont généralement issus d'un plasma.

La technique de gravure plasma est utilisée pour graver tout type de matériaux. Le plasma réagit, non seulement physiquement, mais aussi chimiquement avec la surface d'un wafer, ce qui en retire une partie des substances qui y ont été déposées.

Avantages :

La gravure plasma permet de contrôler les profils de gravures, elle grave de façon anisotrope, ce qui permet d'avoir des flancs verticaux. De plus, on ne manipule pas d'acides dangereux contrairement à la gravure chimique.

Inconvénients :

Cette technique nécessite des équipements spécifiques, ce qui la rend onéreuse. Le taux de gravure est lent, ce qui augmente la durée de la gravure ainsi que les risques de détruire la couche protectrice. Enfin, la gravure plasma n'a aucune sélectivité contrairement à la gravure humide.

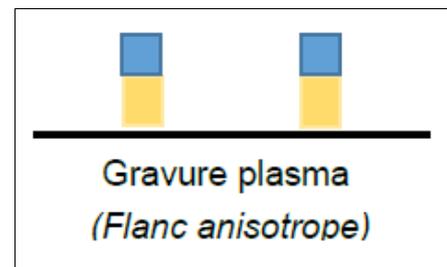


Figure 8 : Gravure plasma

2) Les étapes

a) La photolithographie

Pour fabriquer un composant ou un circuit, il faut définir des zones particulières du wafer qui vont être recouvertes d'un dépôt métallique de contact. La lithographie permet de masquer certaines zones du substrat et d'en laisser d'autres sans protection de façon à traiter précisément certaines parties de la surface sans toucher aux autres. La lithographie est donc un procédé permettant de transférer dans un matériau l'image des motifs désirés.

- **Processus :**

Après le nettoyage du wafer, une résine liquide est appliquée de manière homogène sur le substrat. Le tout est recuit dans une four à 110°C pendant 60 secondes. Cette étape peut être réalisée de manière manuelle ou à l'aide d'un équipement spécifique et automatisé présent dans la zone photolithographie de la salle blanche du LAAS : l' EVG 120



Figure 9 : EVG 120 du LAAS

Sur cette machine, les enductions et les développements se font de façon automatique quelle que soit la résine utilisée car les pistes sont équipées de seringues à dispense automatique. La dispense automatique permet une homogénéité de plus de 99% et une meilleure répétabilité entre les substrats. Le robot permet de faire des chargements automatiques de substrats de 2, 4 et 6 pouces et les recuits se font sur plaque chauffante.

Le dépôt de résine se fait donc par étalement sur le wafer de silicium par centrifugation. L'accélération de la tournette détermine l'uniformité du dépôt, et la vitesse de rotation son épaisseur. Après dépôt, le wafer est séché dans une étuve.

La résine utilisée lors de mon processus est une résine nlof (négative) qui doit avoir une épaisseur de $2,5\mu\text{m}$ après l'étape d'induction à l'EVG120. Pour vérifier l'épaisseur de dépôt, il est important d'utiliser un appareil de mesure adéquat. Le profilomètre du LAAS que j'ai utilisé est un profilomètre mécanique (le KLA-Tencor P16). Son principe est simple, une pointe de diamant vient toucher la surface du wafer. Un capteur solidaire de la pointe mesure la position verticale de celle-ci lorsqu'elle se déplace suivant un axe X. Cela permet donc d'établir le profil de la surface. Ce type de profilomètre possède l'avantage d'être peu coûteux et indépendant des propriétés optiques des matériaux à caractériser.

Pour la suite du processus, il est nécessaire d'utiliser un masque de photolithographie. Un masque est une plaque de verre transparent aux ultra-violets sur laquelle sont représentés des motifs de chrome.

Le côté portant les motifs de chrome est mis en contact avec le substrat recouvert de résine. On fournit ensuite le rayonnement ultra-violet au substrat (au travers du masque). Ce rayonnement est nécessaire à la transformation chimique de la résine, c'est l'étape d'exposition (insolation).

Pour un transfert parfait du motif chrome dans la résine, le masque chrome est plaqué le plus parfaitement possible sur la résine afin d'éviter la diffraction. En général, ce contact se fait sous vide pour retirer le film d'air résiduel entre la résine et le masque.

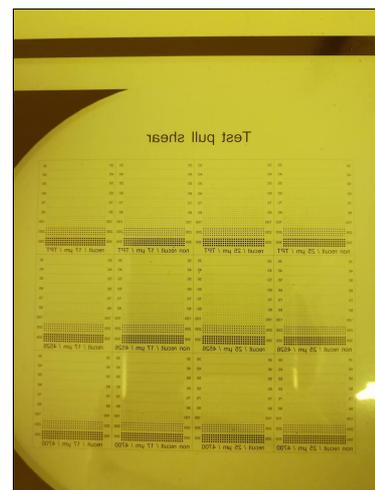


Figure 10 : photo du masque utilisé lors des insulations

Pour transférer les motifs du mask en contact avec le wafer on procède à une insolation (ou exposition) du substrat à l'aide de la MA 150, une machine également disponible en zone photolithographie.

La machine MA150 :

L'aligneur de masque MA150 permet d'insoler des substrats de 4 pouces de diamètre avec un pré alignement à 20 μ m près. Cette machine est équipée de l'alignement double face, c'est-à-dire qu'elle permet d'insoler une face arrière par rapport à la face avant. Les insolations peuvent se faire en proximité, en contact ou en chambre à vide.

Dans le cadre de mon processus je n'avais pas besoin de faire d'alignement. Le wafer était simplement pré-aligné puis insolé directement pour une durée de 5 secondes.

Après insolation le wafer subit une étape de développement sur l'EVG120. Le développeur permet donc de dissoudre une partie de la résine (partie exposée ou non exposée) selon le type de résine utilisée. Cette étape a pour effet de mettre à nu la partie du substrat que l'on souhaite structurer.



Figure 11 : Aligneur de masque MA150 du LAAS

Les types de résines :

Il existe deux types de résines utilisées dans les procédés de photolithographie. Les résines positives et les résines négatives. Leurs différences viennent de leur réaction chimique suite à une exposition à des rayons ultra-violet. La résine positive sera dissoute sous ce rayonnement tandis que la résine négative sera dissoute en l'absence de rayonnement. Lors de mes processus j'ai uniquement effectué des inductions de résine nlof (résine négative), d'une épaisseur de 2,5 μ m à chaque fois.

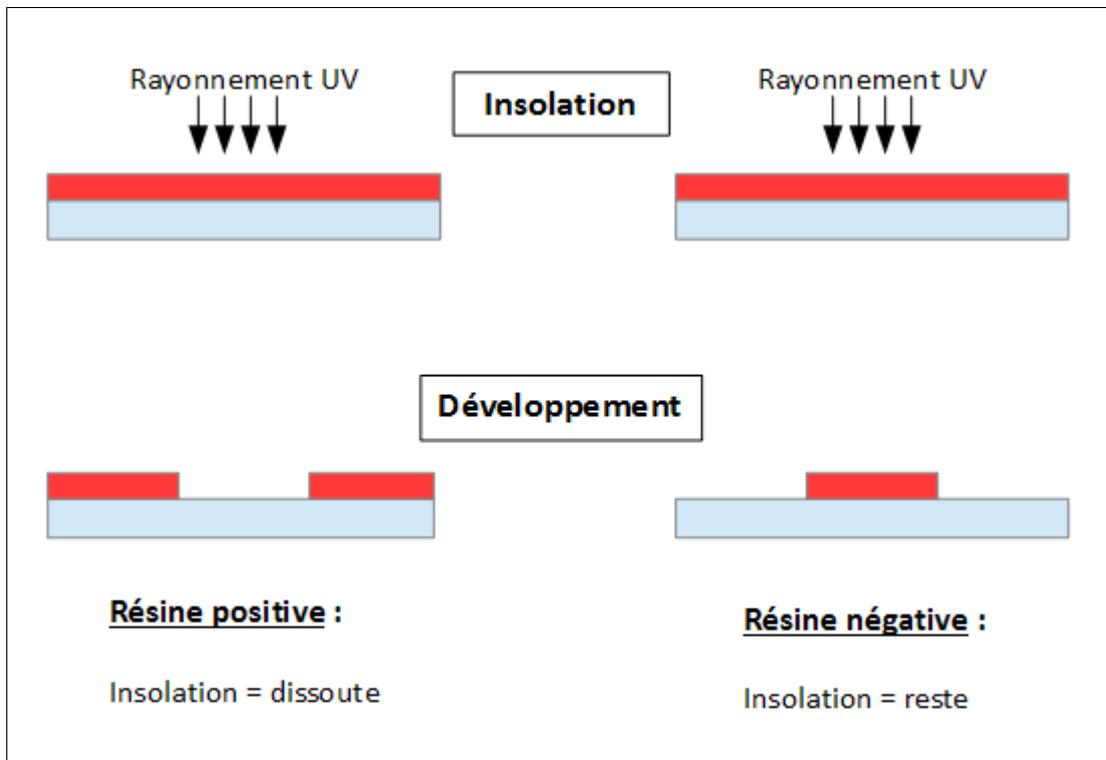


Figure 12 : Influence de la résine

Les modifications chimiques des deux types de résines sont donc dues à une exposition aux ultra-violet. Pour les résines positives, les rayonnements UV ont pour effet de casser les liaisons moléculaires de cette dernière, diminuant ainsi son poids et la rendant par conséquent plus soluble. Dans le cas des résines négatives, les parties exposées à la lumière UV voient leur densité augmenter et leur solubilité diminuer par la même occasion.

Après avoir révélé la résine dans un développeur, le wafer est métallisé (cette technique sera détaillée par la suite). A la fin de la métallisation et dans le cas d'un lift off, un délaquage est nécessaire pour dissoudre la résine restante et ainsi ne laisser que les motifs désirés. Pour ce faire, le wafer est plongé dans un bûcher contenant un solvant (DMSO ou acétone par exemple) en zone chimie de la salle blanche du LAAS.

a) La métallisation

Suite aux étapes vues précédemment, vient l'étape de métallisation, étape durant laquelle, un ou des matériaux cibles (ex : titane et or) vont être déposés sur toute la surface du wafer. Dans la salle blanche du LAAS, une zone est dédiée à la métallisation. On peut y trouver deux méthodes de dépôt : l'évaporation thermique et la pulvérisation cathodique (sputtering).

1. L'évaporation thermique

Cette technique est la plus courante, elle consiste à évaporer un matériau cible en augmentant sa température. Une fois la température de liquéfaction atteinte, la pression de vapeur du matériau devient supérieure à celle résiduelle dans l'enceinte. Cela a pour effet de laisser s'échapper les atomes du matériau qui vont dès lors se propager en ligne droite jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle (paroi de l'enceinte, substrat que l'on souhaite métalliser ou atome se déplaçant dans l'enceinte). Dans le cas où la rencontre se fait avec le substrat, il y aura séjour de l'atome sur la surface avec échange d'énergie et si la surface est sensiblement plus froide que l'atome, il y a condensation définitive.

La rencontre avec une molécule aurait pour conséquence de dévier l'atome évaporé. Il est donc primordial d'avoir une pression à l'intérieur de l'enceinte la plus faible possible pour éviter ces rencontres indésirables. La pression à l'intérieur de l'enceinte est de l'ordre de 10^{-6} Torr.

La chauffe des métaux à déposer peut être faite de deux manières différentes, par effet joule ou par canon à électron.

- Évaporation par effet joule

Dans le cas d'une évaporation par effet joule, on utilise un creuset chauffé par effet joule. Cette méthode est limitée aux matériaux s'évaporant à relativement basse température (et dans tous les cas à des valeurs de température inférieures à la température de fusion du creuset en lui-même).

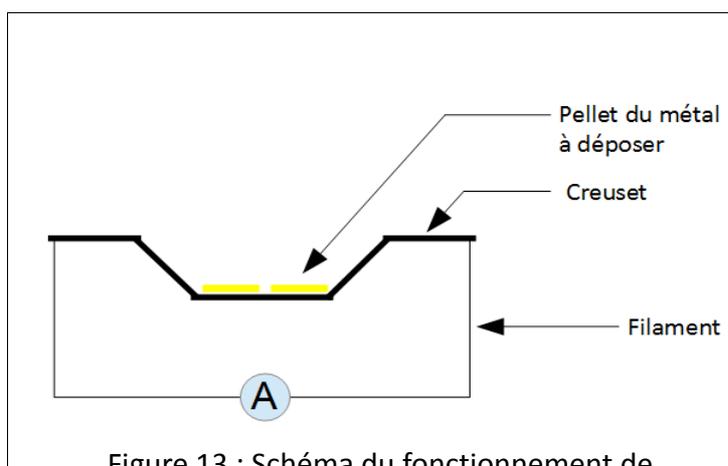


Figure 13 : Schéma du fonctionnement de l'évaporation par effet joule

On applique un fort courant dans le but de chauffer le filament et le creuset et ainsi faire évaporer le métal à déposer.

- Évaporation par canon à électrons

Une seconde technique consiste à user d'un canon à électrons à déflexion électromagnétique. Cela permet d'évaporer tout type de matériau sans risque de pollution par le support. Le faisceau d'électrons est émis par un filament de tungstène qui est focalisé sur un échantillon reposant sur une nacelle de cuivre refroidie par une circulation d'eau. Il est possible de jouer sur la tension d'accélération des électrons et sur le champ magnétique pour cibler différents compartiments de la nacelle contenant différents métaux.

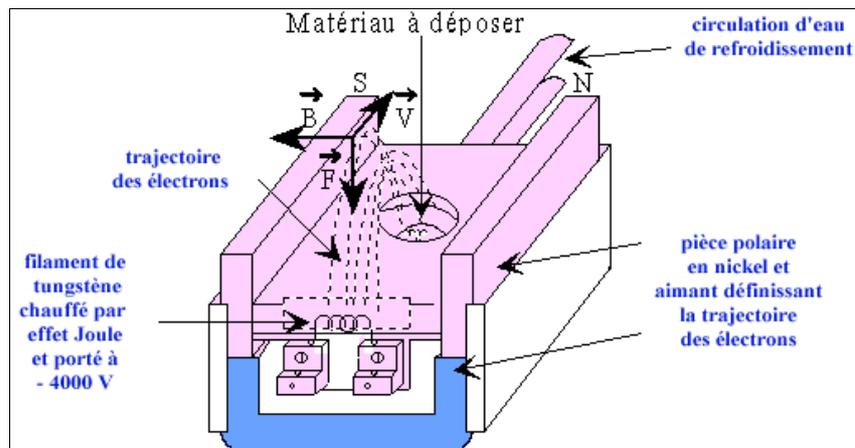


Figure 14 : Principe de fonctionnement d'une évaporation par canon à électrons

Lors de mon stage, j'ai utilisé deux équipements d'évaporation par canon à électrons. La machine EVA600 que j'ai utilisée pour toutes les métallisations de titane-or et chrome-or que j'ai eu à faire et la Plassys qui possède une vitesse d'évaporation plus lente, de l'ordre de 0,2 Å (Angström).



Figure 15 : Machine EVA 600



Figure 16 : Machine Plassys du LAAS

1. Évaporation par pulvérisation cathodique

Le principe de la pulvérisation cathodique repose sur la création d'un plasma localisé autour de la cible à déposer. Les ions du plasma viennent bombarder la matière polarisée négativement et la pulvériser la faisant passer en phase vapeur. Cette matière sous forme de vapeur vient alors se condenser à la surface du wafer.

Les gaz utilisés sont des plasmagènes inertes choisis en fonction du matériau à pulvériser (le plus fréquemment utilisé étant l'argon). Le gaz est injecté à faible pression dans l'enceinte. La cathode (cible) est polarisée négativement ce qui permet la circulation d'un champ électrique entre la cathode et l'anode (relié à la masse). Cela a pour effet d'ioniser l'argon et donc de créer un plasma.

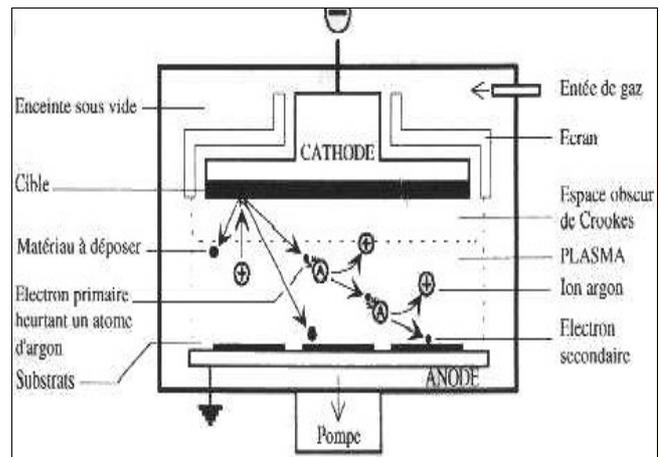


Figure 17 : Schéma d'une enceinte pour pulvérisation cathodique

Avantages liés à cette technique :

- Possibilité de pulvériser relativement facilement des matériaux possédant de très hauts points de fusion.
- Composition de la couche proche de celle de la cible servant de source de matériau.
- Bonne adhérence des couches développées.
- Large gamme de revêtements métalliques possibles.
- Élimination des impuretés et des espèces non suffisamment adhérentes.

Inconvénients de la technique :

- Contrôle de croissance en couche par couche difficile.
- Vitesse de croissance limitée.
- Dégradation possible pour les substrats les plus sensibles.

Une des machines de pulvérisation disponible en salle blanche est capable de réaliser cette méthode, la machine UNIVEX dont j'ai pu me servir également.

Ayant utilisé deux machines d'évaporation et une machine de pulvérisation cathodique, il m'a été possible de comparer leurs impacts sur la fiabilité des contacts.

a) La gravure chimique

Lors de mon stage, je n'ai utilisé qu'une seule des méthodes de gravure vue en première partie, la gravure chimique humide (la gravure plasma n'est pas utilisée pour les métaux car elle entraîne beaucoup trop de pollution à l'intérieur des bâtis de dépôt). Cette technique ne concernait que la moitié de mes wafers métallisés (l'autre moitié étant réalisée en suivant le procédé du lift off) et était réalisée dans des baignoires sous les sorbonnes de la zone chimie de la salle blanche.

Dans le cas d'une gravure sur un wafer de titane et d'or, on utilise une solution de K_2I_2 pour graver l'or et de l'acide fluorhydrique pour le titane. Le laboratoire connaissant le temps moyen de gravure de chaque métaux, il suffit de laisser tremper le wafer dans l'acide durant un court instant et de vérifier visuellement si toutes les parties à graver l'ont bien été. Lorsque la première gravure est terminée il est important de rincer le wafer dans un bac d'eau désionisée avant de procéder à la gravure du deuxième métal afin d'éliminer toute trace d'acide.

Solution à utiliser pour chaque type de gravure :

- Pour graver le chrome : chromium etchant
- Pour graver l'or : K_2I_2
- Pour graver l'aluminium : Acide nitrique
- Pour graver le titane : Acide fluorhydrique

Il est important d'utiliser des gants et de porter des lunettes pour les opérations de gravure car les produits sont classés CMR (cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction).

Une fois ces étapes terminées, la résine déposée au préalable sur le wafer pour en protéger certaines parties doit être retirée à l'aide d'un solvant comme de l'acétone. Enfin le substrat est rincé à l'eau désionisée puis séché.

Après cette opération, une vérification au microscope permet de voir précisément les plots de soudures quelle que soit leur dimension. Cela permet de vérifier qu'ils sont conformes aux attentes et qu'il ne reste aucune trace de résine sur le wafer.



Figure 18 : Sorbonne de la zone chimie de la salle blanche

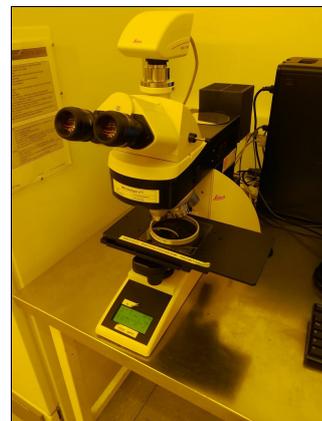


Figure 19 : Microscope de la zone photolithographie du LAAS

2) Câblage microélectronique

Une fois toutes les étapes en salle blanche terminées, les wafers découpés en deux et recuits en partie, les demi-wafers sont sortis de la salle blanche pour aller dans la zone assemblage. C'est une salle équipée pour effectuer toutes les étapes d'assemblage (découpes, microsoudures, tests). Le port de combinaisons particulières n'est pas obligatoire comme en salle blanche, toutefois il est possible d'en porter une et de se munir de gants pour ne pas salir les échantillons que l'on manipule.

Les microsoudures d'or se font sur la machine TPT HB16 qui permet de réaliser du ball bonding ou du wedge bonding suivant les cas. Le principe est plutôt simple, un outil vient mettre en contact le fil de 25 μm de diamètre avec le premier plot de soudure pour le souder par ultrasons. Il se crée alors une inter diffusion métallique entre le fil et le métal sur le plot. L'outil se déplace alors jusqu'au deuxième plot de soudure et réitère l'opération (le déplacement de l'outil peut se faire manuellement ou de manière semi-automatique). Les fils peuvent être d'or, d'aluminium ou de cuivre. Dans le cadre de mon stage, je n'ai eu à faire que des soudures d'or et d'aluminium



Figure 20 : Machine TPT HB16 du LAAS

Dans le cas du ball bonding, un outil va, dans un premier temps, venir chauffer le bout du fil pour y former une boule. Dans un deuxième temps, cette boule sera mise en contact avec le plot de soudure de la même manière que pour la soudure wedge.

Durant mon stage je n'ai utilisé que la méthode de wedge bonding pour mes soudures en veillant à avoir les mêmes paramètres de soudure qui sont :

<u>Soudure 1 :</u>	<u>Soudure 2 :</u>
Puissance : 220 mW	Puissance : 280 mW
Temps : 200 ms	Temps : 200 ms
Force : 310 cN	Force : 310 cN

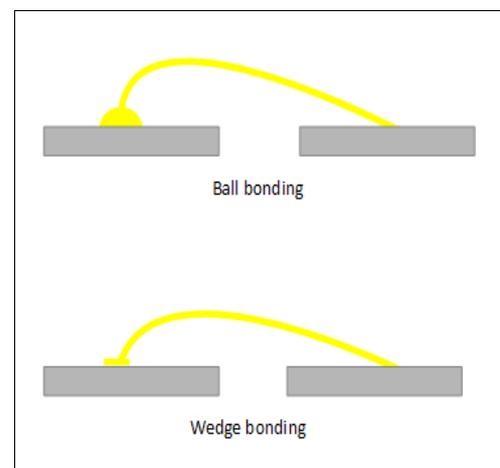


Figure 21 : Différence entre ball et wedge bonding

Il est important de comprendre que le fait même de faire une soudure sur des contacts métalliques fragilise le fil. En effet, l'outil vient se poser sur le plot de métal et le soude par ultrason. Cela a tendance à fragiliser le fil en son extrémité. Au niveau du deuxième plot, le fil doit être sectionné. Ceci demande plus de puissance et fragilise une fois de plus le fil.

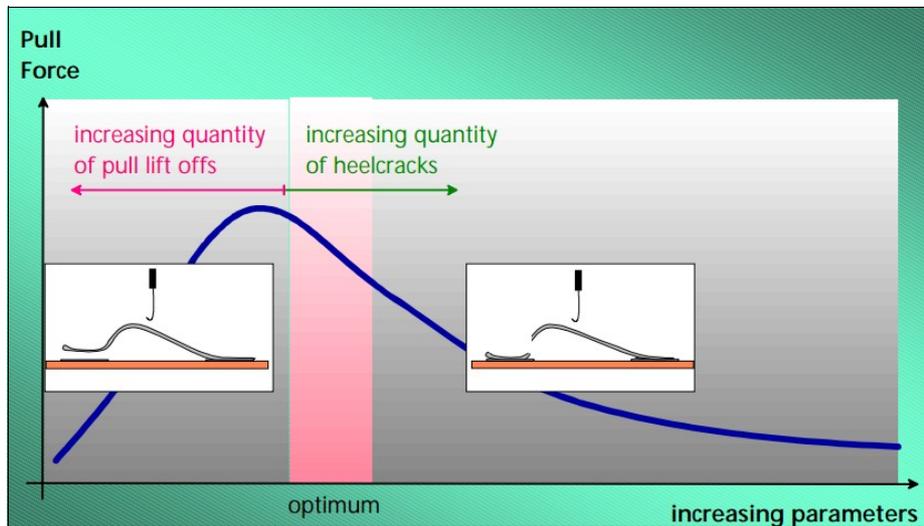


Figure 22 : Influence des paramètres de soudure sur les résultats des tests

La figure 22 montre bien l'impact des paramètres de soudure sur l'issue des tests d'arrachements. En effet, si les paramètres de soudure sont trop faibles, le fil ne va pas du tout adhérer à la surface du métal et le résultat sera un décollement du fil lors du test. En revanche, si les paramètres sont trop élevés, les ultrasons et la force appliqué sur la plaque vont déformer élastiquement le fil. Cela aura pour effet de le fragiliser beaucoup trop et il aura tendance à céder sous une force d'arrachement beaucoup plus faible.

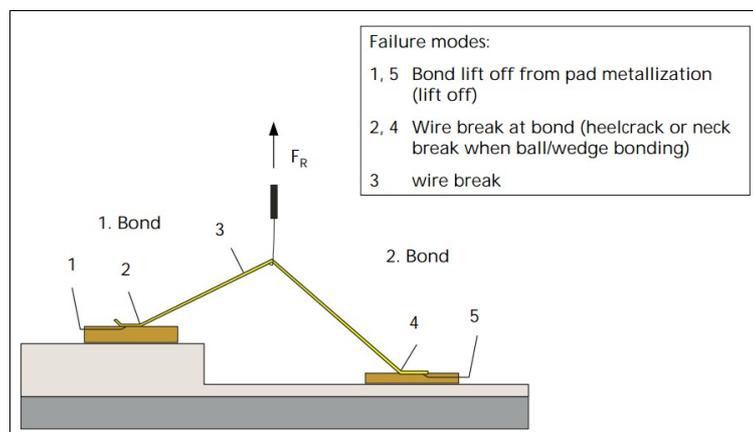


Figure 23 : Point de casse fréquent des microfils de soudures

3) Caractérisation de la résistance des soudures des micro-fils

Cette dernière étape de mon stage consiste à caractériser la résistance mécanique des micro-fils et la fiabilité des contacts. En fonction des différentes métallisations réalisées ou des différentes méthodes de métallisation.

Pour ce faire, j'ai utilisé une des meilleures machines dans ce domaine, la machine XYZTEC. Cette machine permet de faire différents tests comme des tests en cisaillement ou des tests en arrachement. Pour ma part, j'ai dû utiliser la fonctionnalité de test d'arrachement à l'aide d'un crochet pouvant exercer des tractions de 100gf (gramme force). A l'aide des joysticks qui contrôlent la direction des axes x, y et z du crochet, il est possible de faire passer ce dernier sous la boucle de la soudure et de lancer le test.



Figure 24 : Machine Xyztec du LAAS

Le logiciel donne alors la force qu'il a faut appliquer au fil soudé pour qu'il casse. Le microscope permet de voir le test se dérouler et ainsi de vérifier où le fil casse. Un écran s'affiche alors pour référencer le type de cassure qu'a subi le fil (resultcode). Ceci permet une étude statistique plus poussée par la suite.

Les resultcodes permettent de distinguer trois résultats types de test :

- La casse au niveau du fil
- Le décollement de la soudure
- Le délaminage du plot de soudure

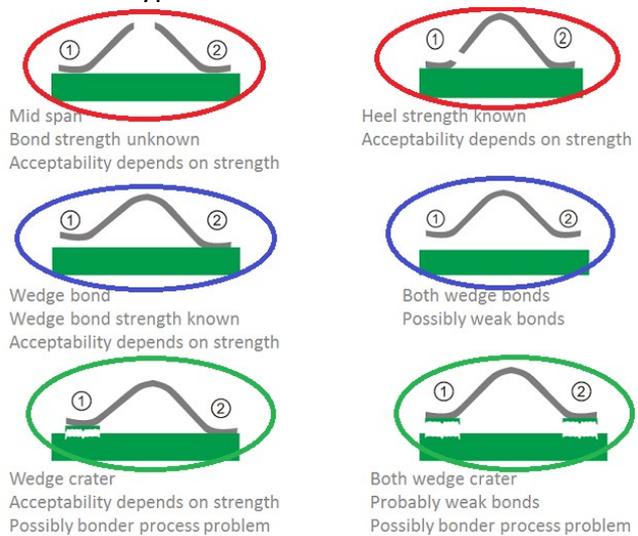


Figure 25 : Résultats possibles des tests d'arrachement (resultcodes)

Résultats obtenus

Au cours de ce stage j'ai pu réaliser de nombreux tests de traction sur différentes métallisations de différentes épaisseurs. Grâce à ces tests, il a été possible de déterminer la moyenne des forces d'arrachement des soudures de chaque demi-wafer ainsi que la dispersion de ces valeurs.

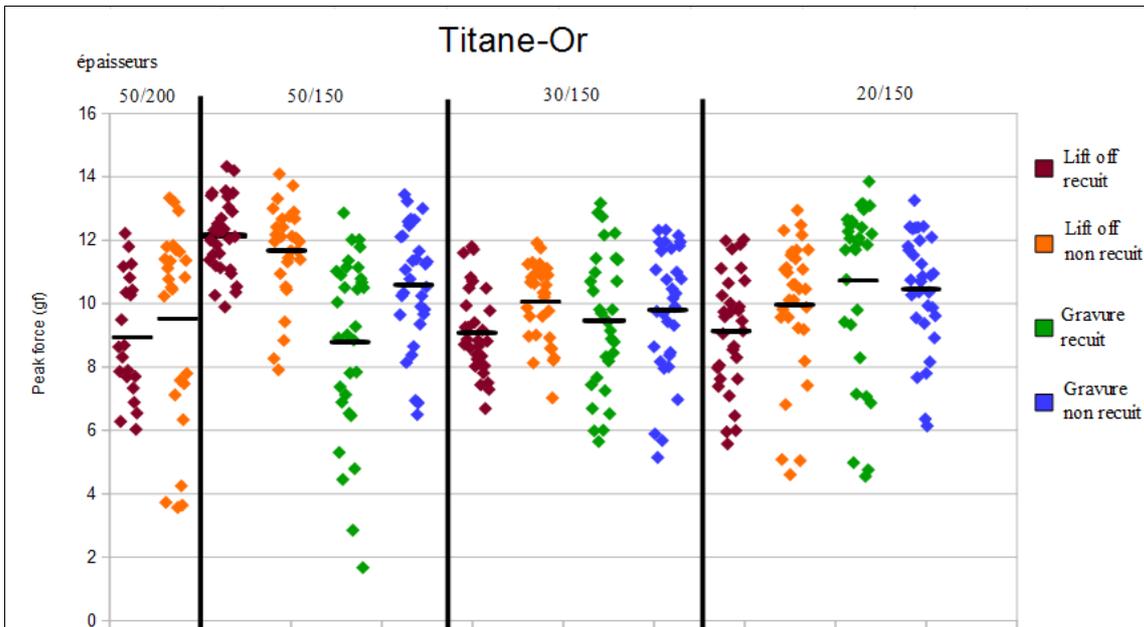


Figure 26 : Graphique : Force d'arrachement en fonction des épaisseurs de métallisation.

Ce premier graphique issu d'une série de tests sur différentes épaisseurs de Titane-or montre la moyenne et la dispersion des valeurs de la force d'arrachement observée lors de chacun des tests sur les différents wafers. On remarque de manière générale une moyenne d'arrachement qui reste assez semblable autour de 10gF ainsi qu'une grande dispersion des valeurs autour de cette moyenne. Cela est peut-être dû à une pollution présente dans les bâtis de métallisation.

De plus, comme le montre le tableau des cassures du fil, le résultatcode le plus présent est celui de la casse du fil au niveau de la première soudure. On remarque alors qu'avec la métallisation titane or les forces d'arrachement sont bien supérieures à la norme de test (cf annexe 3). Cependant, il est impossible de conclure sur la supériorité qualitative d'un procédé de fabrication en particulier. Ceci montre que la soudure entre le fil et le métal est suffisante quelque soit l'épaisseur déposée ou la technique utilisée.

Valeur attendue (nm)	result code			
50-200 titane or	break 1	break 2	lift 1	lift 2
Lift off recuit	9	11	0	0
Lift off non recuit				
Gravure recuit	15	11	0	0
Gravure non recuit				
Valeur attendue (nm)	result code			
50-150 titane or	break 1	break 2	lift 1	lift 2
Lift off recuit	35	2	X	X
Lift off non recuit	38	1	X	X
Gravure recuit	16	22	X	X
Gravure non recuit	23	9	X	X
Valeur attendue (nm)	result code			
30-150 titane or	break 1	break 2	lift 1	lift 2
Lift off recuit	24	10	X	X
Lift off non recuit	31	21	X	X
Gravure recuit	27	11	X	X
Gravure non recuit	24	8	X	X
Valeur attendue (nm)	result code			
20-150 titane or	break 1	break 2	lift 1	lift 2
Lift off recuit	35	12	X	X
Lift off non recuit	23	16	X	X
Gravure recuit	29	4	X	X
Gravure non recuit	32	2	X	X

Figure 27 : Tableau des cassures sur les wafer titane-or

Dans le cas des métallisations chrome-or (cf : annexe 1), les fils nécessitent moins de force pour être arrachés de la soudure. Les résultats codes prédominants sont : la cassure du fil en deuxième soudure ou le délaminage de la métallisation elle-même. Par conséquent, on remarque que la métallisation chrome-or présente des soudures moins résistantes que celle de titane-or mais toujours supérieur à la norme (cf : annexe 3). Les batis utilisés pour faire les dépôts métalliques étant les mêmes quel que soit les métaux désirés, le problème de pollution semble être responsable de la dispersion des résultats. On observe cependant plus fréquemment des arrachements de l'or sur le chrome montrant une faiblesse mécanique dans la soudure créée entre le fil et le chrome. Il serait intéressant de modifier les paramètres de soudure qui ne semble pas être suffisant à la création d'un inter métallique fiable entre le fil d'or et la métallisation chrome or.

En ce qui concerne les techniques de dépôt, la gravure devrait être meilleure que le lift off dans le sens où le wafer est directement métallisé après le nettoyage. Le lift off quant à lui subit une étape de masquage de résine avant d'être métallisé ce qui augmente les risques de contamination.

D'autre part, le fait de recuire ou non le wafer à la fin du procédé n'a, d'après les graphiques, que peu d'influence sur la qualité des contacts. Pourtant le fait de recuire le wafer après métallisation permet une diffusion de la métallisation dans le silicium et ainsi de renforcer l'accroche entre les deux. L'explication vient peut-être du fait que la résistance de rupture du fil est largement inférieure à celle qui existe entre la métallisation et le substrat. Afin de caractériser au mieux ce paramètre et déterminer l'influence des techniques de dépôt, il serait intéressant de faire des essais avec des fils plus gros sur de plus petites surfaces métalliques.

En ce qui concerne la dispersion des résultats, j'ai mené une étude sur l'impact de la propreté des batis de métallisation. 3 wafers ont subi un dépôt de 200nm d'aluminium en suivant un procédé de gravure. Ils ont été métallisés dans 3 équipements différents. Le graphique ci-dessous montre l'importance d'utiliser un bâti propre. En effet, la machine UNIVEX étant un nouvel équipement du LAAS, elle ne procède pas à une métallisation différente et limite donc la pollution à l'intérieur de l'enceinte. Cela donne donc de meilleurs résultats (comme le montre la figure 28). Les valeurs d'arrachement sont moins dispersées et donc plus fiables.

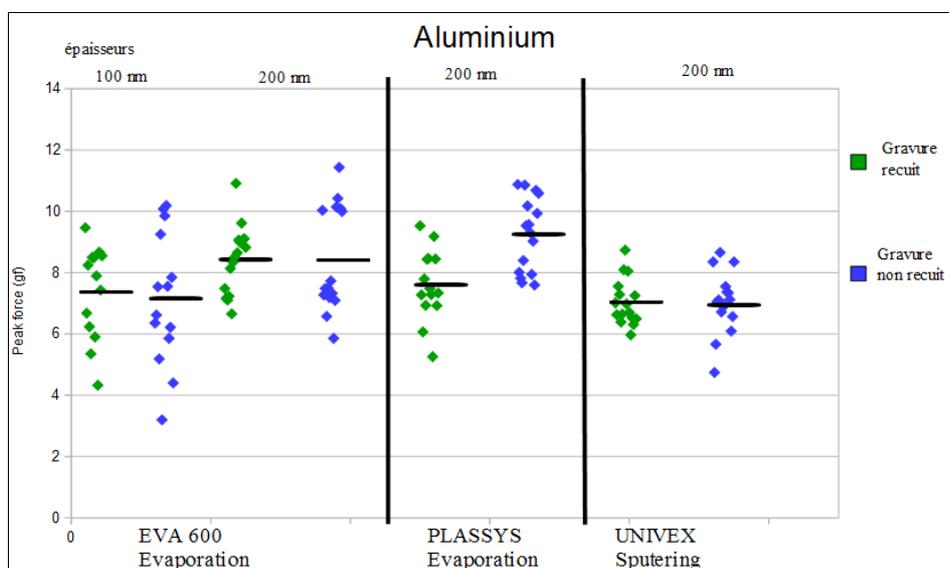


Figure 28 : Graphique : Influence de l'équipement utilisé sur la dispersion des valeurs

Conclusion

L'objectif de mon stage était de commencer la collecte d'informations qui alimenteront une base de données référençant les différents processus de fabrication de plots de soudures avec les différentes métallisations que peut faire le laboratoire du LAAS. Pour cela j'ai dû collecter une grande quantité de données obtenues suite à plusieurs séries de tests.

Mon stage s'est déroulé en deux étapes. Dans un premier temps, j'ai étudié l'impact des processus de fabrication permettant de créer des plots de soudures. J'en ai identifié deux différents : le lift off et la gravure. Sur chacun de ces processus deux paramètres entrent en jeu, le fait de recuire ou non le wafer à la fin et les différentes épaisseurs et métaux utilisés. Dans un second temps, j'ai eu à étudier l'influence de l'équipement utilisé pour métalliser les wafers de silicium. Les métallisations étaient toutes en aluminium de 200nm effectuées dans trois machines différentes.

Durant cette période de 12 semaines, j'ai rencontré quelques difficultés pendant la préparation des wafers de test. En effet le processus était long et nécessitait plusieurs produits chimiques. Au début, il m'est arrivé de confondre certaines recettes lors de mes manipulations. Cela étant dû au fait que je ne connaissais pas forcément les phénomènes physico-chimiques entrant en jeu lors du traitement des substrats. J'utilisais donc des recettes sans vraiment savoir quel impact elles auraient sur mes wafers.

Malgré tout, j'ai réalisé la totalité des tests sur le titane-or, le chrome-or ainsi que l'aluminium. Ces tests ont montré que la soudure entre le fil et le plot en or résistait beaucoup plus que ce que préconisait la norme de test (2 à 3 fois supérieur pour le titane-or). D'autre part, il est difficile d'étudier l'influence d'une gravure, d'un lift off et d'un post recuit étant donné que l'on arrive à la limite de résistance du fil. En effet, en faisant un test d'arrachement il est possible de qualifier la résistance de la soudure entre le fil et la métallisation car la soudure ne casse pas. Néanmoins il est impossible de quantifier l'impact des méthodes sur la résistance mécanique des soudures étant donné que l'on arrive à la limite de résistance du fil. Pour pallier à ce problème, il serait préférable de souder avec des fils plus épais ou des plots de contact plus petit ce qui permettrait d'étudier l'impact de chaque méthode de dépôt sans atteindre le point de rupture du fil.

D'autre part, les tests des différents équipements de métallisation montrent que la méthode de pulvérisation cathodique donne des valeurs d'arrachement moins dispersées et donc plus fiables. Ces résultats peuvent être dus au fait que l'équipement est neuf et n'a donc pas été utilisé pour d'autres types de métallisation. Cela permet d'éviter le mélange des métaux dans l'étuve et limite donc les pollutions et les alliages possibles qui pourraient être néfastes pour la qualité des plots. Dans l'idéal, pour avoir le moins de pollution possible, le laboratoire devrait avoir une machine de dépôt pour chaque métal utilisé.

A la fin de ce stage, plusieurs données ont été récoltées sur les métallisations les plus fréquemment utilisées au LAAS. Cependant, tous ces tests ont été effectués sur des substrats de silicium. Il serait donc intéressant de poursuivre les tests sur d'autres substrats tels que le verre qui est également beaucoup utilisé dans les processus effectués en salle blanche. Il serait également intéressant de refaire des métallisations dans des bâtis propres et de modifier les paramètres de soudure pour étudier l'influence que cela pourrait avoir sur les soudures.

Table des illustrations

Figure 1 : Batiment Jean LAGASSE du LAAS	3
Figure 2 : Répartition des zones de la salle blanche du LAAS	3
Figure 3 : Wafer de silicium vierge	4
Figure 4 : Epaisseur des métaux à étudier (nm).....	4
Figure 5 : Schéma du procédé de nettoyage	5
Figure 6 : Résumé schématique d'un procédé de lift off.....	6
Figure 7 : Gravure humide	7
Figure 8 : Gravure plasma.....	8
Figure 9 : EVG 120 du LAAS.....	8
Figure 10 : Photo du masque utilisé lors des insulations.....	9
Figure 11 : Aligneur de masque MA150 du LAAS.....	10
Figure 12 : Influence de la résine.....	11
Figure 13 : Schéma de fonctionnement d'une évaporation par effet joule.....	12
Figure 14 : Principe de fonctionnement d'une évaporation par canon à électon.....	13
Figure 15 : Machine EVA 600	13
Figure 16 : Machine PLASSYS du LAAS	13
Figure 17 : Schéma d'une enceinte pour pulvérisation cathodique	14
Figure 18 : Sorbonne de la zone chimie de la salle blanche	15
Figure 19 : Microscope de la zone photolithographie du LAAS	15
Figure 20 : Machine TPTHB16 du LAAS	16
Figure 21 : Différence entre ball et wedge bonding	16
Figure 22 : Influence des paramètres de soudure sur les résultats des tests	17
Figure 23 : Point de casse fréquent des microfils de soudures.....	17
Figure 24 : Machine XYZTEC du LAAS	18
Figure 25 : Résultats possibles des test d'arrachements.....	18
Figure 26 : Graphique : Force d'arrachement en fonction des épaisseurs de métallisation....	18
Figure 27 : Tableau des cassures sur les wafer titane-or	18
Figure 28 : Graphique : l'influence de l'équipement utilisé sur la dispersion des valeurs.....	19

Bibliographie

nettoyage wafers :

http://perso.telecom-paristech.fr/~grillot/Page%20web_fichiers/NettoyageSi.pdf

EVG 120 :

<http://www.laas.fr/files/pistes.FR.pdf>

Photolithographie :

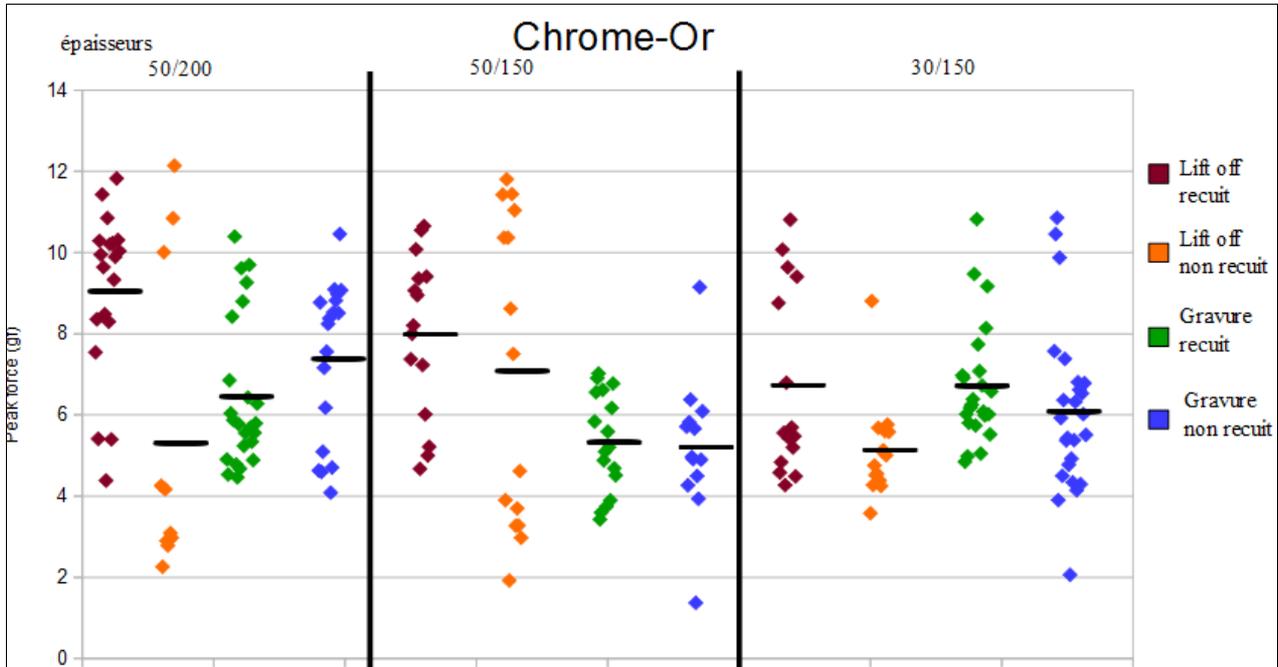
http://www.eea.univ-montp2.fr/IMG/pdf/FME346_techno_d_litho.pdf

Métallisation :

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vaporation_sous_vide

Annexe

Annexe 1 : Résultats Graphique des forces d'arrachement pour une métallisation chrome-or



Annexe 2 : Norme IPC-TM-650 classant mes séries de test dans les « test Condition D »

5.1.3 Test Condition D - Wire Pull (Double Bond) This procedure is identical to that of test condition C, except that the pull is applied by inserting a hook under the lead wire (attached to die, substrate or header or both ends) with the device clamped and the pulling force applied approximately in the center of the wire in a direction approximately normal to the die or substrate surface or approximately normal to a straight line between the bonds. When a failure occurs, the force causing the failure and the failure category shall be recorded. The minimum bond strength shall be taken from Table 1. Figure 1 may be used for wire diameters not specified in Table 1. For wire diameter or equivalent cross section >125 μm, where a hook will not fit under the wire, a suitable clamp can be used in lieu of a hook.

Annexe 3 : Table montrant la résistance minimum des fils de métaux suivant le type de test et le diamètre du fil.

Table 1

Test Condition	Wire Composition and diameter ¹	Construction ²	Minimum bond strength (grams force)	
			Pre seal	Post seal and any other processing and screening when applicable
A	-	-	Given in applicable document	
C or D	AL 18 µm	Wire	1.5	1.0
	AU 18 µm		2.0	1.5
C or D	AL 25 µm	Wire	2.5	1.5
	AU 25 µm		3.0	2.5
C or D	AL 32 µm	Wire	3.0	2.0
	AU 32 µm		4.0	3.0
C or D	AL 33 µm	Wire	3.0	2.0
	AU 33 µm		4.0	3.0
C or D	AL 38 µm	Wire	4.0	2.5
	AU 38 µm		5.0	4.0
C or D	AL 76 µm	Wire	12.0	8.0
	AU 76 µm		15.0	12.0
F	Any	Flip-chip	5 grams-force x number of bonds (bumps)	
G or H	Any	Beam lead	30 grams force in accordance with linear millimeter of nominal undeformed (before bonding) beam width. ³	

1. For wire diameters not specified, use the curve of Figure 1 to determine the bond pull limit.
 2. For ribbon wire, use the equivalent round wire diameter width which gives the same cross-sectional area as the ribbon wire being tested.
 3. For condition G or H, the bond strength shall be determined by dividing the breaking force by the total of the nominal beam widths before bonding.

Annexe 4 :

Graphique exprimant la limite de résistance du fil en fonction du diamètre de celui-ci ainsi que de sa nature.

