

***Chapitre II : Etat de l'Art des  
Technologies Mémoires et les  
Formations Suivies***

## **2.1 Introduction**

*Dans les mémoires conventionnelles, la dimension des dispositifs élémentaires a été réduite avec succès, permettant d'atteindre des capacités de stockage importantes. Cependant, avec la réduction de taille de la grille flottante, ces cellules mémoires atteindront leurs limites physiques dans un futur proche, la charge stockée devenant de plus en plus faible et empêchant une discrimination non-ambigüe des deux états binaires. L'introduction de nouveaux matériaux ou de nouveaux concepts mémoires est alors proposée pour résoudre ces problèmes. Bien que l'intégration de nouveaux matériaux au sein d'une architecture microélectronique entraîne des contraintes de fabrication supplémentaires, plusieurs technologies restent néanmoins prometteuses. Parmi elles, les mémoires à commutation de résistance aussi appelées ReRAM (Resistive Random Access Memories) proposées dans une perspective de développement de mémoires à très haute densité, en sont un bon exemple.*

## **2.2 Etat de l'art des mémoires ReRAM**

*La mémoire ReRAM se base comme son nom l'indique sur la capacité du composant à pouvoir stocker une information logique par la variation de sa résistivité contrôlée par l'application d'une tension : Ce composant est appelé switch résistif.*

### **2.2.1 Découvertes**

*Ce phénomène de variation de résistivité est observé dès 1960 même s'il n'est alors pas bien compris selon Pierre Camille Lacaze [3]. D'importants travaux vont être menés sur le phénomène dans le but de concevoir un composant potentiel de la microélectronique qui émerge dans les mêmes moments. Ces travaux vont être abandonnés au profit du composant dont l'étude est plus avancée et dont nous entrevoyons déjà les spectaculaires capacités : le MOSFET 1967. Ce n'est que récemment que le phénomène retrouve sa place dans les laboratoires, surtout à partir de 2005, avec comme objectif de se substituer à la technologie flash dont les limites seront prochainement atteintes.*

*La structure du composant est très simple, elle n'est pas sans rappeler celle d'un condensateur c'est-à-dire un sandwich Métal/Isolant/Métal (MIM). Dès sa première observation, plusieurs théories tentent d'expliquer la variation réversible de la résistance de cette structure très simple [3] :*

*- La première théorie imagine un stockage massif de charges opposées à la surface de chaque électrode amenant à des courants de diffusion à travers l'isolant.*

- La seconde théorie était basée sur la formation et rupture de filament de conduction entre les électrodes. C'est ce dernier modèle qui s'avèrera être le plus proche des observations expérimentales.

### 2.2.2 Principe de fonctionnement

La majorité des travaux effectués considèrent aujourd'hui que le mécanisme principal de variation de résistance du composant en fonction du potentiel appliqué est donc dû à la présence ou non d'un filament conducteur reliant entre elles les deux électrodes. Ainsi lorsque le filament est formé le composant a un état résistif bas soit un état logique ON et dans le cas d'une absence de filament un état résistif élevé soit un état logique OFF [4].

Il existe plusieurs phénomènes identifiés qui amènent à la commutation d'état de résistivité. Lorsque celui-ci dépend de l'amplitude de la tension appliqué quel que soit son signe nous parlons de commutation unipolaire et la caractéristique courant tension est asymétrique. Dans le cas où la commutation dépend également du signe de la tension appliquée nous parlons de commutation bipolaire avec une caractéristique courant-tension symétrique. Ces deux schémas de caractéristiques apparaissent dans la Figure 2 :

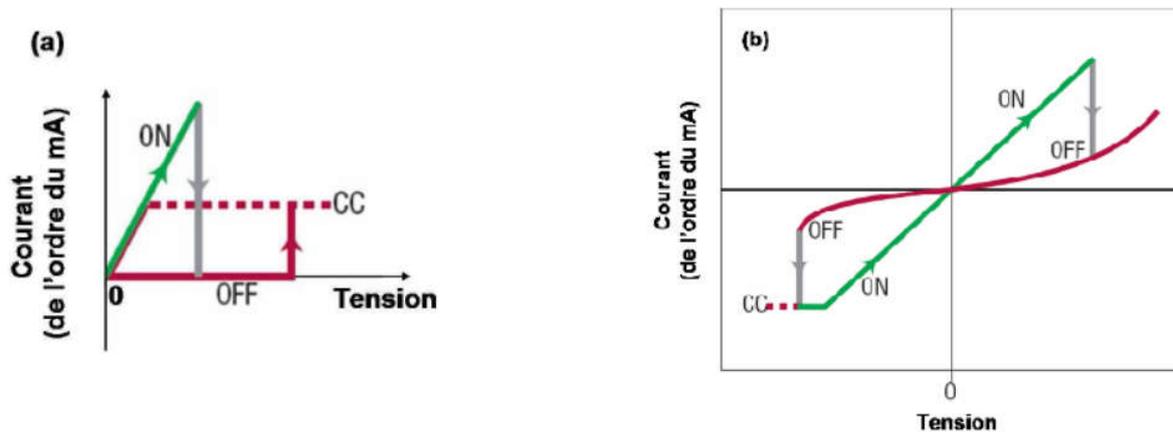


Figure 2: Schéma des caractéristiques courant-tension de mémoire ReRAM :

a) unipolaire ; b) bipolaire [4]

### 2.2.3 Phénomènes de commutation filamentaire

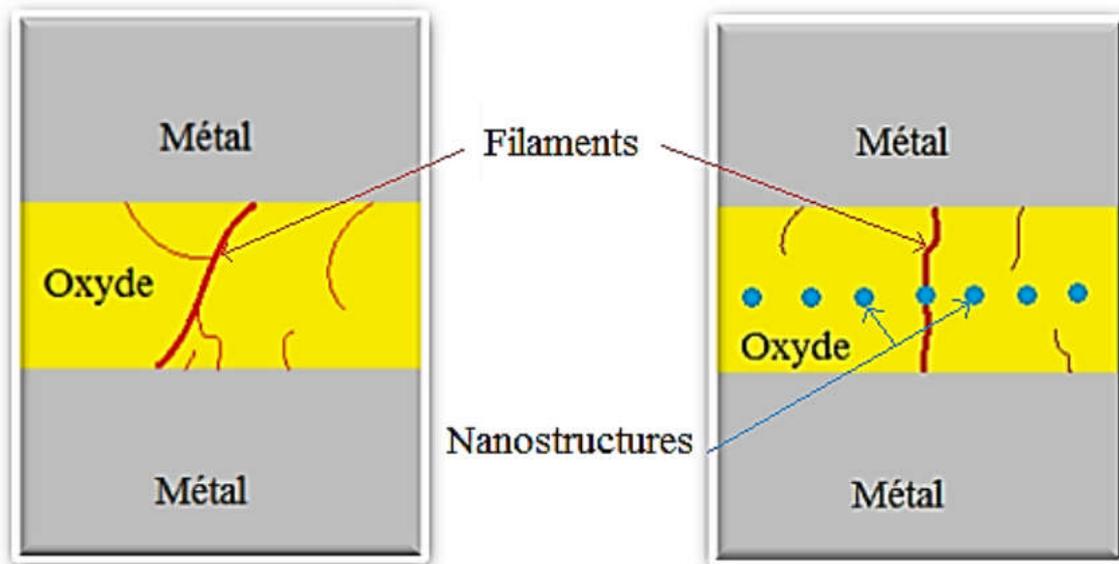
L'un des phénomènes connus de formation du filament de métal est un mécanisme thermo-chimique dit de métallisation. Ce phénomène a lieu dans les structures ayant une électrode en métal actif, et la seconde en métal inerte. Le filament se forme alors à partir du métal actif qui s'ionise sous l'effet du champ électrique et forme petit à petit un filament conducteur en précipitant

sur l'électrode inerte. L'état de résistivité basse est atteint lorsque le filament rejoint entre elles les deux électrodes. Il faut une polarisation inverse pour rompre le filament. Il est à noter que la première formation de filament laisse un grand nombre d'atome de l'électrode active au sein de l'isolant, ce qui facilitera la création des prochains filaments. La commutation a donc lieu par diffusion ionique dans l'isolant, processus que nous imaginons très long et dépendant en grande partie des défauts de l'isolant. Il se trouve que les besoins de miniaturisation font que ce problème est totalement transparent tellement les distances de diffusion dans l'isolant mince sont faibles.

Le temps de formage du filament lors du claquage est très long, mais il forme le chemin des futurs filaments dont le temps de formage sera extrêmement réduit et relativement reproductible. Le nombre de filament dans une même structure est souvent très limité car la formation d'un filament concentrera toutes les lignes de courant ce qui empêchera le formage d'autres filaments à proximité. Cependant il est à noter que ces formages de filaments sont totalement aléatoires et donc potentiellement non homogènes d'un composant à l'autre [5], [6], [7].

#### ***2.2.4 Amélioration des dispositifs***

Un intérêt tout particulier, durant ce projet de fin d'étude, va être apporté au rôle de l'ajout de nanostructures dans l'oxyde de notre mémoire RRAM. Sujet de nombreuses études actuelles, celles-ci pourraient considérablement augmenter les caractéristiques de nos mémoires par plusieurs phénomènes. A l'origine, l'ajout de nanostructure a été imaginé pour améliorer la reproductibilité de formation de filament dans les structures. En effet, par soucis de répétabilité il est souhaitable d'avoir une même réponse à un même stimulus dans la totalité de nos composants car la fiabilité de cette réponse est prépondérante dans l'optique de commercialiser ces mémoires. Comme le filament est créé de manière aléatoire lors de sa première formation et que chacun des changements d'état de la mémoire est lié à ce phénomène, il est nécessaire de trouver un moyen de le contrôler. L'ajout de nanostructure est très vite apparu comme une des solutions les plus aisées et les plus efficaces: en faisant croître des nanostructures soit à la surface d'une des électrodes, soit au milieu de l'isolant comme schématisé sur la Figure 3, il se crée des chemins favorables à la réalisation du filament. De cette manière nous augmentons à la fois l'homogénéité de nos mémoires mais également nous réduisons leurs temps de commutation. De plus il a été constaté que grâce à la réduction de la longueur des filaments, ceux-ci étaient plus stables dans le temps et nous augmentions de surcroit le temps de rétention de l'information [8], [9].



**Figure 3 : Schéma représentant l'effet de l'ajout de nanostructure au sein de l'isolant. [9]**

La présence de ces nanostructures concentrerait efficacement le courant en déviant les lignes de potentiel constant, les faisant converger. Ainsi les phénomènes de formations de filaments expliqués précédemment dans le chapitre « Phénomènes de commutation » seront non plus aléatoire mais dirigés grâce à ces structures [5].

La plupart des études utilisent des matériaux très différents aussi bien pour les électrodes, pour l'isolant que pour les nanostructures. Ces dernières sont bien souvent métalliques et leur impact va varier en fonction de leurs positions d'implantation dans la couche d'isolant [10].

Dans notre cas nous proposons d'améliorer les caractéristiques d'une mémoire en introduisant des nanocristaux d'oxyde d'indium (nc-  $\text{In}_2\text{O}_3$ ). En effet, l'oxyde d'indium  $\text{In}_2\text{O}_3$  est un semi-conducteur qui présente quelques avantages. L'oxyde d'indium  $\text{In}_2\text{O}_3$  possède un offset de bande de conduction plus important que les autres avec le dioxyde de Silicium  $\text{SiO}_2$ , ce qui pourrait conduire à un meilleur confinement des électrons dans les nanostructures d'oxyde d'indium (nc-  $\text{In}_2\text{O}_3$ ) et donc un meilleur temps de rétention.

L'oxyde d'indium est un matériau semi-conducteur de type n, les éventuelles lacunes d'oxygène existant dans le matériau viennent rapporter un dopage de type n supplémentaire. Ces sources de dopage n entraînent que le niveau de Fermi de l' $\text{In}_2\text{O}_3$  se trouve dans la bande de conduction, c'est-à-dire qu'ils sont des matériaux généralement dégénérés.

Le travail de sortie de l' $\text{In}_2\text{O}_3$  est parmi les plus élevés chez les semi-conducteurs, il vaut environ 5 eV et peut être modulé par des traitements de surface.

Nos nanostructures d'indium représentent un nouveau matériel au sein de l'Institut des Nanotechnologies de Lyon, c'est pour cela nous avons été ramené à faire plusieurs études sur nos échantillons avant de pouvoir continuer la construction de nos mémoires dites ReRAM.

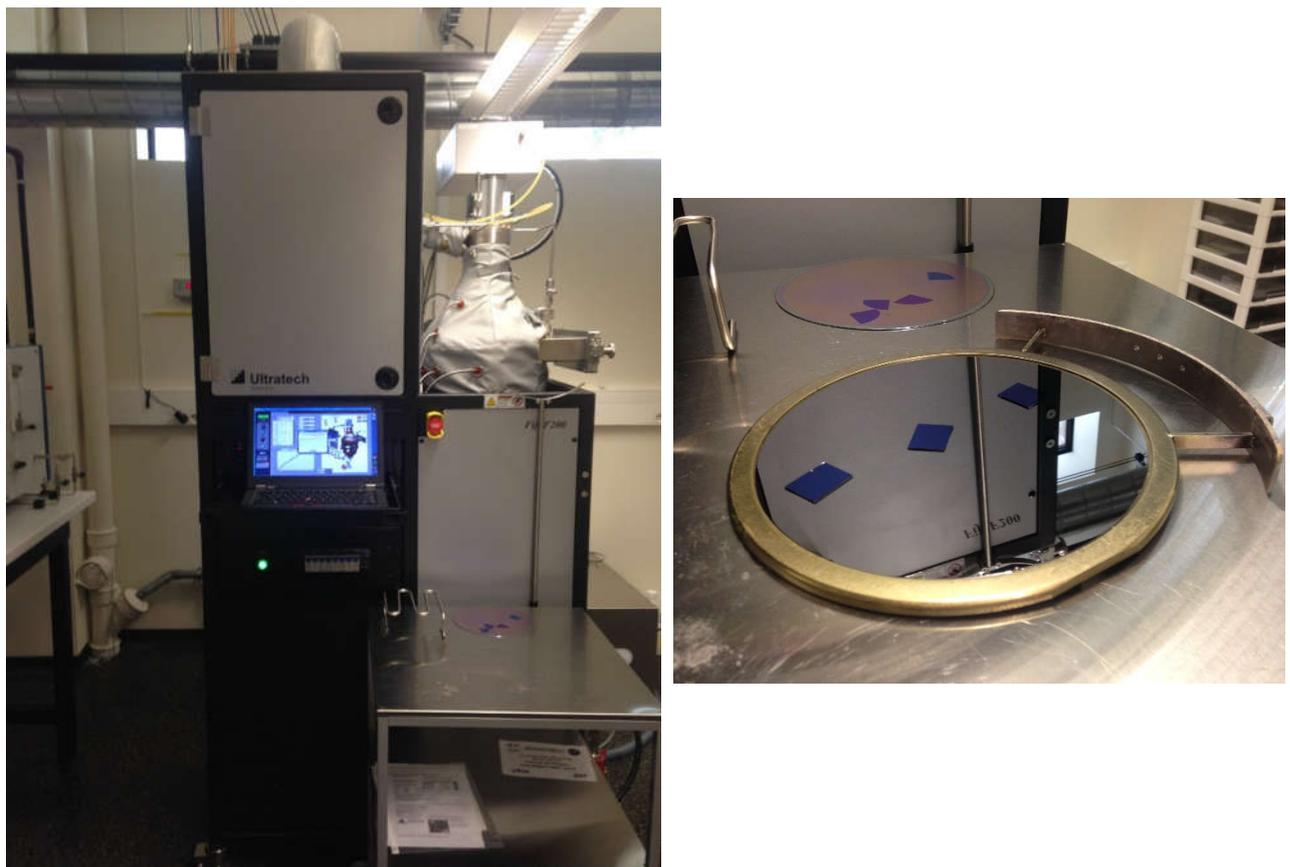
## **2.3 Formations Effectuées pour la fabrication et la caractérisation**

Afin de pouvoir faire nos études, nous avons été dirigé à faire plusieurs formations dans le but d'accéder aux différentes machines disponibles telles que :

### **2.3.1 L'Atomic Layer Deposition :**

L'Atomic Layer Deposition (ALD) est un procédé de dépôt de couches minces atomiques. Le principe consiste à exposer une surface successivement à différents précurseurs chimiques afin d'obtenir des couches ultra-minces. Il est utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs.

L'énorme avantage de l'ALD est de pouvoir faire une monocouche sur une surface présentant un très fort rapport d'aspect (des creux et des bosses).

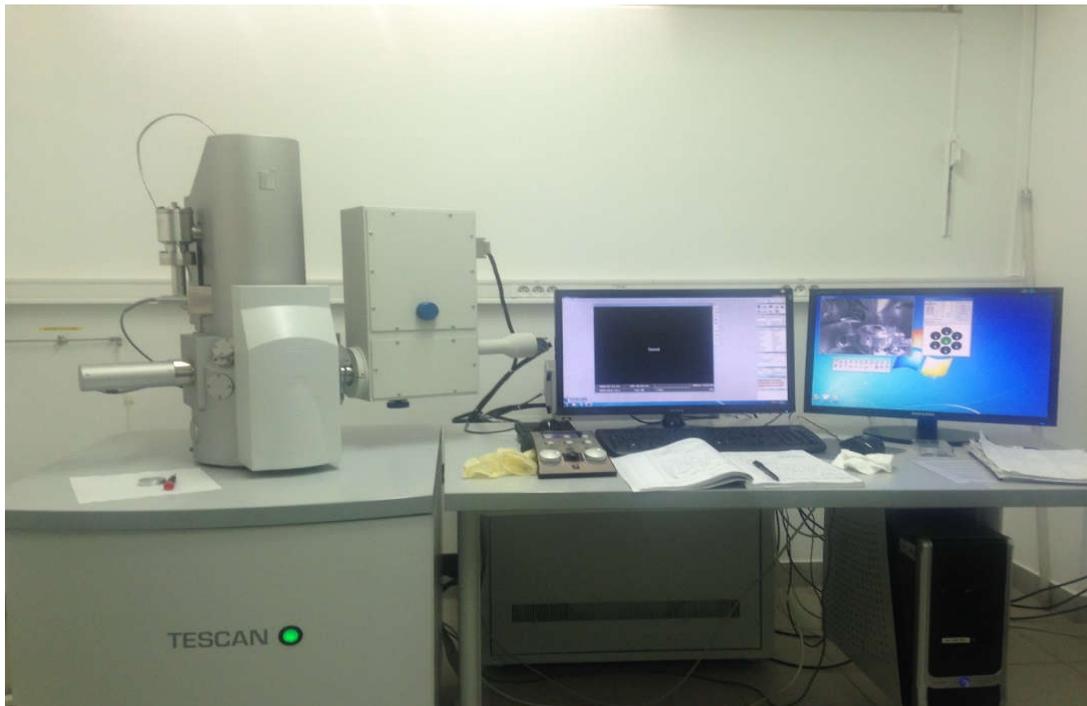


**Figure 4: Equipement de l'Atomic Layer Deposition au sein de l'INL**

### **2.3.2 Le Microscope Electronique à Balayage**

Un microscope électronique à balayage est essentiellement composé d'un canon à électrons et d'une colonne électronique, dont la fonction est de produire une sonde électronique fine sur l'échantillon, d'une platine porte-objet permettant de déplacer l'échantillon dans les trois directions et de détecteurs permettant de capter et d'analyser les rayonnements émis par l'échantillon.

On a eu recours à ce microscope pour observer la taille et la densité de nos nanocristaux d'indium.



**Figure 5 : Equipement du Microscope Electronique à Balayage au sein de l'INL**

### **2.3.3 Le Four à Recuit Rapide**

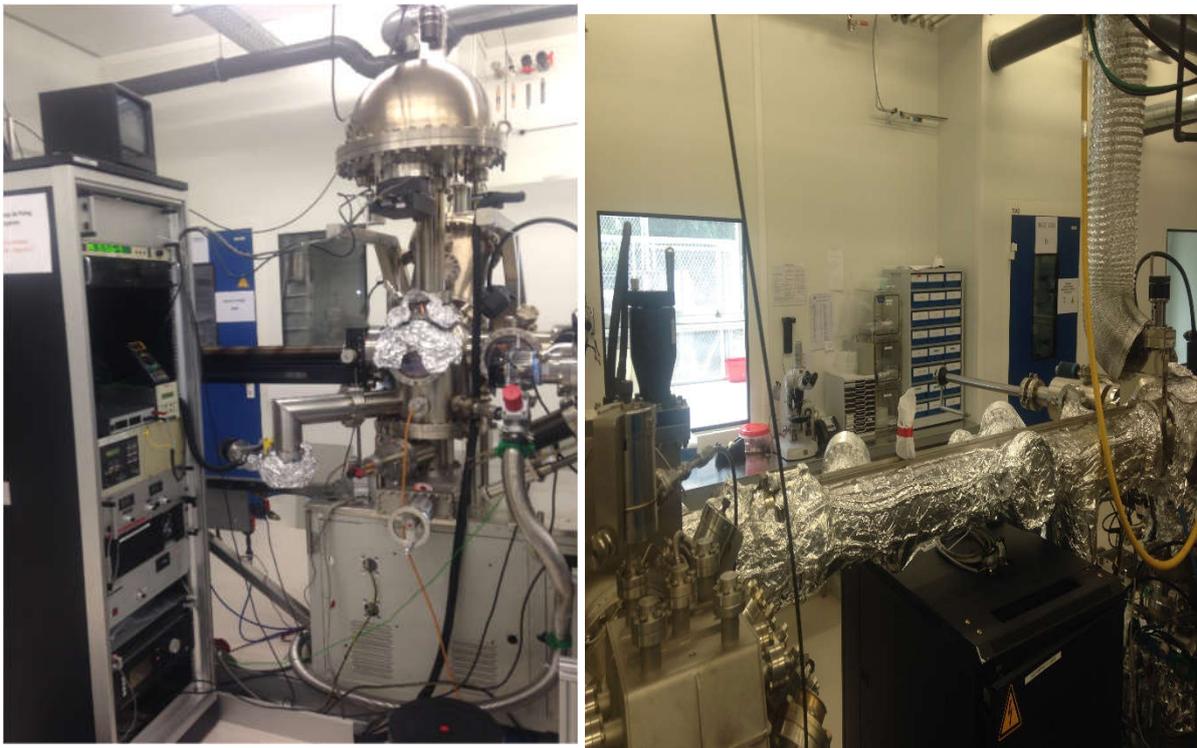
Le recuit rapide, ou Rapid thermal anneal en anglais, est un procédé qui consiste à chauffer une plaquette (wafer) pour en modifier les propriétés structurales. Les traitements thermiques peuvent servir à activer des dopants, relaxer des contraintes, diffuser des matériaux à l'interface, cristalliser une couche. Dans notre cas ce four nous a servi à observer l'influence de la température sur nos nanostructures d'indium.



**Figure 6: L'équipement du four à recuit rapide au sein de l'INL**

### **2.3.4 Spectrométrie photoélectronique X (XPS : X-Ray photoelectron spectrometry)**

Au cours de notre procédé on a eu également besoin de ce qu'on appelle la spectroscopie de photoélectrons X qui est utilisée dans les domaines de la recherche, du développement ou encore de la fabrication. Cette technique permet d'obtenir la composition chimique d'une surface d'un matériau sur une profondeur de 4nm. On peut déterminer, par exemple si ce matériau est oxydé en surface, ou s'il contient du fer ou du carbone, etc... Ce qui nous intéresse, c'est sa composition, c'est-à-dire, le pourcentage atomique de chacun de ces constituants.



**Figure 7: Equipement XPS (Spectrométrie photoélectronique X) à l'école Centrale de Lyon**

### **2.3.5 Evaporation par canon d'électrons**

Comme dernière étape vient la métallisation. Afin de constituer nos contacts on a eu recours à ce qu'on appelle une évaporation par canon d'électrons.

Ce système est spécifiquement dédié aux dépôts de métaux en couches minces. Il comprend une chambre à vide dans laquelle sont installées d'une part une source d'évaporation par faisceau d'électrons et d'autre part trois cibles de quatre pouces de diamètre pour la pulvérisation magnétron. Un sas permet de transférer les échantillons rapidement dans la chambre de dépôt. Cet appareil permet de déposer des couches de bonne qualité avec un bon contrôle sur l'épaisseur et une excellente uniformité.

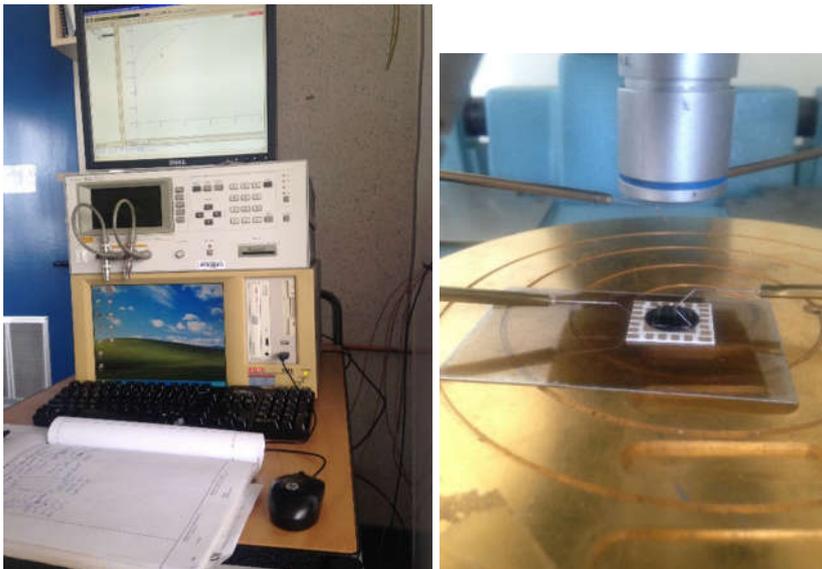
Comme l'image du dessous le montre, on a utilisé des masques de tailles différentes afin de réaliser nos contacts.



**Figure 8 : Equipement d'évaporation par canon d'électrons ainsi que les masques utilisés**

### 2.3.6 Le Keithley 4200

Le Keithley 4200 est un système modulaire, personnalisable, et un analyseur de paramètres entièrement intégré qui fournit un aperçu synchronisé de courant-tension (I-V), capacité-tension (C-V), et la caractérisation électrique I-V. Il permet aussi de passer sans effort entre I-V et les mesures C-V sans re-câblage ou de soulever des aiguilles posées sur l'échantillon. Le Keithley 4200 accélère le contrôle des dispositifs complexes pour la recherche, la conception des dispositifs semi-conducteurs, le développement de procédés, ou de la production.



*Figure 9 : Equipement du Keithley 4200 au sein de l'INL*

## 2.4 Conclusion

Grace à toutes ces formations réalisées nous avons eu accès à ces différentes machines afin de réaliser et nos tests et nos dépôts finaux que nous détaillerons dans le chapitre suivant.