

ESIEE
PARIS

une école de la
 CCI PARIS ILE-DE-FRANCE

PROGRAMME D'ACCELERATION
TECHNOLOGIQUE

ESIEE  connect



Annexe 3

PLATEFORMES, PROCÉDES ET EQUIPEMENTS

Juin 2017



Table des matières

A) LA PLATEFORME SALLE BLANCHE ESIEE Paris	3
1) DESCRIPTION GENERALE	3
2) NATURE ET DIMENSIONS DES SUBSTRATS.....	4
3) PROCEDES ET EQUIPEMENTS DISPONIBLES	4
I. Nettoyage	5
II. Traitements thermiques.....	6
III. Dépôt de couches minces.....	8
IV. Photolithographie.....	11
V. Electrodeposition	12
VI. Gravure humide.....	13
VII. Gravure sèche par plasma.....	13
VIII. Scellement de substrats	15
IX. Caractérisation / Métrologie	16
X. Découpe, packaging et montage back-end	17
B) LA PLATEFORME COMMUNICATIONS RF, MICROONDES ET OPTIQUE	18
C) LOGICIELS DE CONCEPTION DISPONIBLES.....	18
D) LA PLATEFORME SYSTEMES EMBARQUES.....	19

N.B. : La liste des équipements et la description des procédés ci-après sont fournies uniquement à titre indicatif afin de donner un aperçu des possibilités technologiques des différentes plateformes pour le prototypage.

A) LA PLATEFORME SALLE BLANCHE ESIEE Paris

1) DESCRIPTION GENERALE

La salle blanche ESIEE Paris regroupe environ 70 équipements répartis sur une superficie totale de 650 m². L'intérieur, majoritairement en classe 10 000 (ISO 7), est structuré en plusieurs zones dédiées chacune à un type de procédé : nettoyage et gravure chimique, dépôt de couches minces, caractérisation, etc. (Figure 1). Elle inclut un espace de 58 m² en classe 100 (ISO 5) pour les étapes les plus sensibles telles que la photolithographie et le scellement de substrats (cf. sections IV et O), et une zone pour le packaging et le montage *back-end*, en classe 100 000 (ISO 8) à accès indépendant par un second sas d'habillage. Toutes les facilités techniques nécessaires au bon fonctionnement de ces salles sont intégrées dans le bâtiment moderne achevé début 2017 : centrale de traitement de l'air, centrale de traitement de l'eau, retraitement des effluents liquides et gazeux, etc.

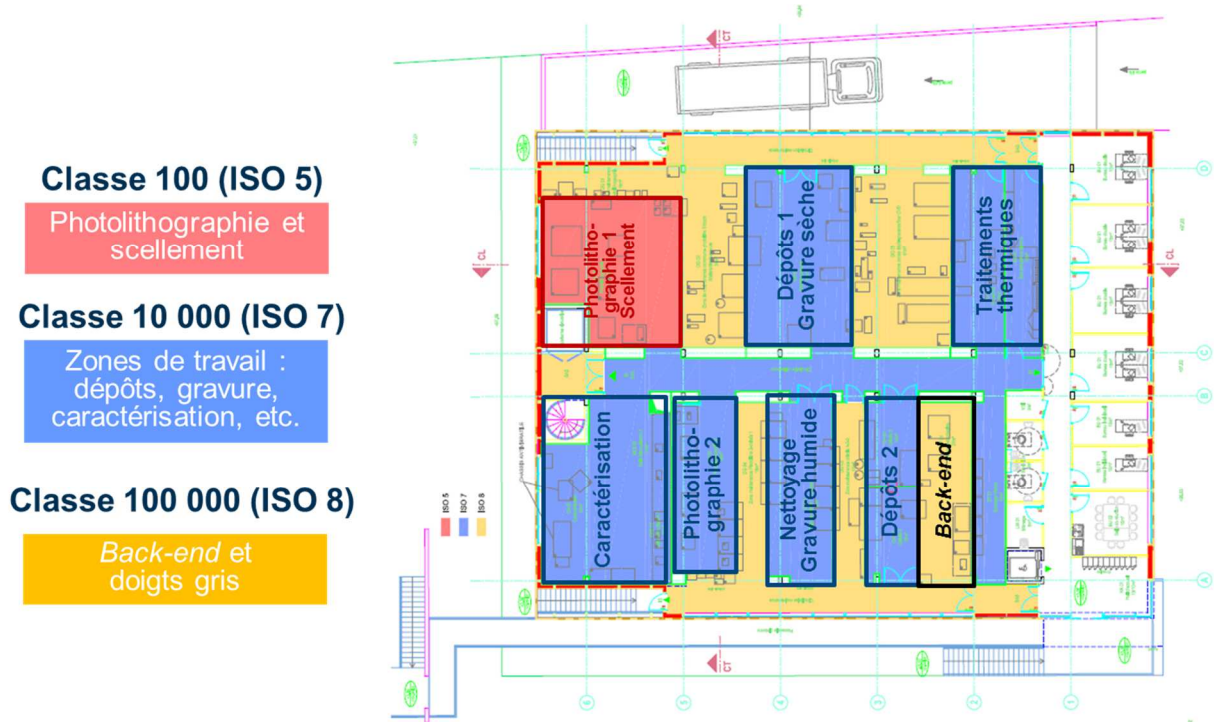


Figure 1 : Structuration de l'intérieur des salles blanches ESIEE Paris par zone de procédé et classes correspondantes.

2) NATURE ET DIMENSIONS DES SUBSTRATS

Les types de substrats utilisés classiquement dans les salles blanches ESIEE Paris sont les suivants :

- substrats classiques en microélectronique : plaques ou « wafers » en silicium dopé p ou n, « Silicon-on-Insulator » (SOI) avec une couche d'oxyde enterrée, verre,
- alumine et céramique,
- films souples,
- matériaux piézoélectriques (substrats massifs ou couches minces),
- matériaux carbonés (nanotubes de carbone, diamant, graphène, etc.).

Des demandes concernant d'autres types de matériaux peuvent être soumises.

Tous les équipements disponibles sont compatibles avec des substrats de 4" (soit 10,16 cm) de diamètre. Certains équipements sont également compatibles avec des substrats de dimensions différentes : 2", 6" et 8" (soit respectivement 2,54 ; 15,24 et 20,32 cm) de diamètre.

3) PROCÉDES ET EQUIPEMENTS DISPONIBLES

Les salles blanches de ESIEE Paris offrent une grande diversité de procédés technologiques pour la réalisation d'ensembles complexes tels que les éléments sensibles d'un capteur ou un laboratoire sur puce, obtenus par superposition et/ou assemblage de matériaux structurés à l'échelle micrométrique. Les 70 équipements disponibles couvrent l'ensemble de la chaîne de fabrication depuis le *front-end* jusqu'au *back-end* (Figure 2), c'est-à-dire depuis la conception jusqu'à la découpe de puces individuelles et leur mise en boîtier et câblage.

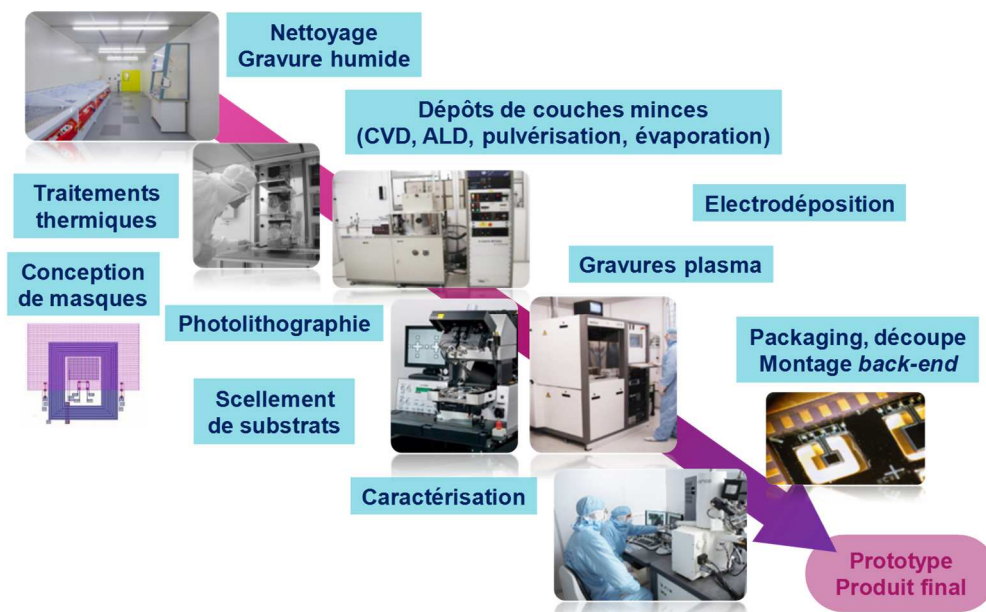


Figure 2 : Procédés disponibles au sein des salles blanches ESIEE Paris, du *front-end* au *back-end*.

I. Nettoyage

Les opérations de nettoyage ont pour but d'éliminer les contaminants organiques et métalliques présents sur les substrats avant d'effectuer les autres étapes du procédé (oxydation, dépôts, photolithographie, etc.).

PROCEDURE DE NETTOYAGE STANDARD POUR LES WAFERS SILICIUM (RCA)

- Elimination des contaminants organiques et des particules, en milieu oxydant
RCA1: $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) à 80°C, t = 10 mn
- Elimination de la fine couche d'oxyde
 $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ (1:50 ou 100) à 25°C, t = 15 s
- Elimination des contaminants ioniques
RCA2: $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (1:1:6) à 80°C, 10 mn
- Rinçage à l'eau dé-ionisée, séchage sous gaz inerte N_2

PROCEDE PIRANHA

La solution de nettoyage Piranha est un mélange d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$:3/1) à fort pouvoir oxydant qui permet d'enlever les contaminants organiques à la surface des substrats. Le traitement dans la solution Piranha crée une très fine couche d'oxyde (1 à 2 nm) aisément gravée dans l'acide fluorhydrique HF dilué. Outre le nettoyage, cette solution peut être utilisée pour rendre hydrophile la surface du silicium.

DEGRAISSAGE SOLVANTS

Pour certains substrats, en fonction des conditions auxquelles ils ont été exposés précédemment, une étape de dégraissage sous ultrasons dans des solvants comme l'acétone et l'éthanol peut être ajoutée avant le procédé de nettoyage standard.

La salle blanche ESIEE Paris est équipée de 9 paillasses de chimie pour le nettoyage (Figure 3) : 3 pour les solvants et 6 pour les acides dont une conçue pour les plus grands substrats, de diamètre 8".



Figure 3 : Paillasses de chimie pour le nettoyage des substrats.



II. Traitements thermiques

OXYDATION THERMIQUE DU SILICIUM

La croissance d'oxyde de silicium est obtenue par la réaction d'espèces oxydantes à la surface du silicium (O_2 en atmosphère sèche ou H_2O en atmosphère humide) à haute température (800 à 1200°C) et à pression atmosphérique selon les réactions chimiques suivantes :

- $Si + O_2 \Rightarrow SiO_2$ (oxydation sèche)
- $Si + 2 H_2O \Rightarrow SiO_2 + 2 H_2$ (oxydation humide)

L'oxydation du silicium consomme une épaisseur de silicium égale à environ la moitié de l'épaisseur de la couche d'oxyde formée. L'oxydation par voie sèche produit des oxydes de silicium de plus faible résistivité donc de meilleure qualité isolante que par voie humide. Cette dernière est en revanche plus rapide.

La salle blanche ESIEE Paris est équipée de 2 fours tubulaires de marque Semco Engineering (l'un en atmosphère sèche et l'autre en atmosphère humide) compatibles avec des substrats de diamètre 2", 3" et 4" pour la croissance d'oxyde de silicium, de 10 nm à 2 μm d'épaisseur. Le four d'oxydation sèche offre la possibilité d'ajouter de l'acide chlorhydrique HCl afin de supprimer les ions métalliques qui pourraient se trouver dans l'atmosphère, pour les applications critiques comme les oxydes de grille MOS.

REDISTRIBUTION DES DOPANTS

La redistribution ou diffusion des dopants dans le silicium permet aux dopants de type p ou n de diffuser dans le volume du silicium jusqu'à la profondeur souhaitée, à haute température (800 à 1200°C) et à pression atmosphérique. Cette opération se déroule sous atmosphère oxydante (O_2 ou H_2O) afin d'éviter la diffusion des espèces dopantes en dehors du silicium.

La salle blanche ESIEE Paris est équipée de 2 fours tubulaires de marque Semco Engineering compatibles avec des substrats de diamètre 2", 3" et 4" pour la redistribution des dopants, l'un pour ceux de type p et l'autre pour ceux de type n.

DÉPÔT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR (CVD)

Les opérations de dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition ou CVD) sont réalisées dans des fours sous vide à une pression quelques dizaines de mTorr à quelques Torr, à des températures comprises entre 200 et 900°C à partir de gaz précurseurs du matériau souhaité.

Les deux techniques principales sont la « Low Pressure Chemical Vapor Deposition » ou LPCVD et la « Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition » ou PECVD. Les propriétés des couches obtenues (composition stœchiométrique, densité, vitesse de gravure, constante diélectrique, contraintes mécaniques, indice de réfraction, etc.) diffèrent selon la technique et les paramètres du dépôt (pression, température, débits des gaz, puissance plasma). Les dépôts LPCVD sont réalisés à basses pressions (quelques dizaines de mTorr) et hautes températures, à de faibles vitesses, tandis que les dépôts PECVD se font à des vitesses nettement supérieures du fait de la pression plus élevée (quelques Torr) nécessaires à la création du plasma. Les températures de dépôt PECVD sont

comprises entre 200 et 400 °C, permettant ainsi le dépôt d'isolants sur des substrats métalliques et également d'obtenir des couches avec de plus faibles contraintes mécaniques.

La salle blanche ESIEE Paris est équipée de 2 fours tubulaires (Figure 4) compatibles avec des substrats jusqu'à un diamètre de 4", l'un LPCVD de marque SEMY Engineering pour le dépôt de nitrure de silicium et de poly-silicium intrinsèque (non dopé) et l'autre PECVD de marque ASM pour le dépôt de nitrure de silicium, selon les réactions suivantes :

- LPCVD : $3 \text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 4 \text{NH}_3 \Rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6 \text{HCl} + 6 \text{H}_2$
- LPCVD : $\text{SiH}_4 \Rightarrow \text{Si} + 2 \text{H}_2$
- PECVD : $3 \text{SiH}_4 + 4 \text{NH}_3 \Rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 24 \text{H}_2$



Figure 4 : Fours tubulaires pour le dépôt (a) par LPCVD et (b) par PECVD.

RECUIT METAUX ET POLYMERES

La salle blanche ESIEE Paris dispose également d'équipements dédiés au recuit de métaux (aluminium, cuivre) et de polymères (type polyimide) sous atmosphère inerte :

- Tube de recuit aluminium de marque INTERTHERM sous N_2 ou forming gaz N_2/H_2 (substrats jusqu'à un diamètre de 4")
- Tube de recuit sous vide de marque ASM pour le recuit des polyimides et du cuivre (substrats jusqu'à un diamètre de 4")
- Four de recuit polyimide Fisher Scientific : atmosphère inerte N_2 , contrôle de la montée et de la descente en température

III. Dépôt de couches minces

Les couches déposées sont dites minces lorsque leur épaisseur est comprise entre quelques nanomètres et quelques micromètres. Différentes techniques de dépôt sont disponibles sur la plateforme : pulvérisation cathodique (ou sputtering), évaporation thermique et Atomic Layer Deposition (ALD) pour les métaux, alliages, oxydes et nitrures, et dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour le parylène.

PULVÉRISATION CATHODIQUE (SPUTTERING)

Le principe de la pulvérisation cathodique est de créer un plasma entre 2 électrodes à partir d'un gaz neutre (Argon) sous vide. Une source solide du matériau à déposer constitue la cathode et le substrat sur l'anode. La cible sur laquelle se trouve le matériau à déposer est portée à un potentiel négatif et est bombardée par les ions positifs Ar^+ du plasma. Les ions Ar^+ arrachent des atomes de la surface du matériau qui vont se déposer sur le substrat qui se situe sur l'anode. Le matériau à déposer peut-être un métal, un alliage ou même un matériau isolant. La pulvérisation d'isolants nécessite l'utilisation d'une polarisation RF (13,56 MHz) ou DC afin d'entretenir le plasma dans l'enceinte et de permettre aux ions Ar^+ d'arracher les atomes de la cible.

La plupart des bâtis sont dotés d'un dispositif appelé Magnétron. Il s'agit d'un système d'aimants permanents de polarité magnétique différente, placé sous la cible afin de piéger les électrons et donc d'augmenter la probabilité qu'ils rencontrent des atomes d'argon et les ionisent. Il en résulte une vitesse de dépôt plus élevée, en contrepartie d'une usure inhomogène de la cible.

La surface du substrat peut être nettoyée *in situ* par bombardement avec les ions Ar^+ en mode RF par exemple afin d'éliminer la couche d'oxyde natif à la surface du silicium. Le dépôt de couches d'oxyde ou de nitrure est réalisé en injectant dans l'enceinte sous vide de l'oxygène O_2 ou de l'azote N_2 en complément de l'Argon. Dans ce cas de figure, la pulvérisation est appelée pulvérisation réactive.

Trois bâtis de pulvérisation cathodique sont disponibles à ESIEE Paris :

- Un bâti SCM 600 de marque Alcatel avec pompe cryogénique et sas de chargement, modes DC, RF, Bias et nettoyage par gravure réactive (substrats de diamètre 2", 4" et 6"), Matériaux disponibles : Aluminium (Al), Or (Au), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), alliage Titane/Tungstène (10% Ti / 90% W), Tungstène (W)
- Deux bâtis MP500S de marque Plassys (Figure 5) avec sas de chargement, pompe turbo moléculaire, modes DC, RF, Bias, nettoyage par gravure réactive (substrats de diamètre 2" et 4"), Matériaux disponibles : Aluminium (Al), Molybdène (Mo), Nickel (Ni), Platine (Pt), Tantale (Ta), Titane (Ti), Pulvérisation réactive : Nitrure d'Aluminium piézoélectrique (AlN), nitrure de Tantale (TaN), oxyde de silicium (SiO_2).

Des demandes concernant d'autres matériaux peuvent être soumises.

/! A noter : les échantillons sont fixés sur des supports inclinés vers le bas au sein de ces bâtis.



Figure 5 : Bâti de pulvérisation cathodique Plassys MP500S pour le dépôt de métaux, alliages, oxydes et nitrures.

ÉVAPORATION THERMIQUE

Le métal à déposer est évaporé sous vide secondaire en étant porté à haute température soit par effet Joule ou grâce à un canon à électrons afin de passer de l'état solide à l'état vapeur (sublimation). Les atomes diffusent dans la chambre vers le substrat qui se situe sur un support en rotation qui permet d'améliorer l'uniformité du dépôt.

Un bâti BJD1800 de marque TEMESCAL muni d'une pompe turbo moléculaire et d'un canon à électrons est disponible pour les dépôts d'Aluminium sur des substrats de diamètre 2", 4" et 6".

ATOMIC LAYER DEPOSITION (ALD)

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. Elle est largement utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs car elle présente l'énorme avantage de pouvoir réaliser une monocouche conforme sur des surfaces tridimensionnelles à fort rapport d'aspect (rapport largeur sur hauteur). En effet, la réaction a lieu directement à la surface du substrat au sein de la monocouche de gaz précurseurs adsorbés.

La salle blanche ESIEE Paris dispose d'un bâti de dépôt ALD R200 de marque PicoSun (Figure 6) compatible avec des substrats jusqu'à un diamètre de 6", seul ou par rack de 25 substrats maximum. L'équipement est configuré pour recevoir 2 sources de précurseurs à pression de vapeur saturante élevée comme le Triméthyl Aluminium (TMA) et 2 sources de précurseurs à très faible pression de vapeur. Les dépôts possibles sont de type simple ou multicouches Al_2O_3 ou TiO_2 d'une épaisseur de quelques couches atomiques jusqu'à plusieurs dizaines de nanomètres, voire plus. En fonction des demandes, les possibilités d'*up-grade* comprennent l'ajout d'un générateur d'ozone (O_3) et de lignes de gaz nécessaires au dépôt de matériaux comme le Platine (Pt), le nitrure d'aluminium (AlN) ou de titane (TiN) ou encore une évolution vers la technique « Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition » (PEALD).



Figure 6 : Bâti PicoSun pour le dépôt par ALD de couches atomiques.

DÉPÔT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR (CVD)

Il est possible de réaliser des dépôts sous vide et à température ambiante de polymère de type parylène à partir d'un précurseur solide (poudre) vaporisé. Après vaporisation, le gaz est pyrolysé pour obtenir des molécules monomères. Elles sont injectées dans la chambre du bâti et se déposent à la surface du substrat pour former un film transparent et conforme. En effet, les molécules de gaz pénètrent facilement dans les structures étroites, à fort rapport d'aspect, ce qui permet une encapsulation complète et uniforme. Le système permet un contrôle précis de la vitesse de dépôt et donc de l'épaisseur. La gamme d'épaisseur va de quelques dizaines de nanomètres à quelques centaines de micromètres voire millimètres. L'épaisseur optimale est déterminée en fonction de l'application et des propriétés recherchées. Parmi ces applications, la réalisation de technologies en films souples, des revêtements biocompatibles pour les implants ou encore la tropicalisation de circuits et cartes électroniques (protection pour des utilisations dans des environnements climatiques sévères).

L'équipement disponible est un Labcoater 2 de marque Specialty Coating Systems) avec une chambre de dépôt de diamètre 30,5 cm sur une hauteur de 30,5 cm soit un volume de 22 L. Les dépôts qui y sont réalisés sont en parylène C, le dérivé présentant la meilleure biocompatibilité.



IV. Photolithographie

La photolithographie a pour but de transférer l'image d'un masque sur un substrat préalablement couvert d'une couche fine de résine photosensible (épaisseur de quelques centaines de nanomètres à quelques dizaines de micromètres).

Cela est fait généralement par enduction par centrifugation à plusieurs milliers de tours par minute où le support est maintenu sur un plateau rotatif par aspiration sous vide. Après étalement de la résine, un recuit permet d'évaporer le solvant qui la rendait liquide/visqueuse. Les résines photosensibles doivent être manipulées dans une salle isolée de la lumière UV (vitres oranges, Figure 7) et sous extraction car elles contiennent des solvants dangereux.

Le film de résine photosensible est ensuite exposé aux UV au travers d'un masque. Le masque est généralement une plaque de verre avec une couche très fine de chrome qui comporte les motifs souhaités, comme un pochoir. Pour une bonne reproduction des motifs, il est essentiel que le film de résine soit étroitement en contact avec le masque, dans le plan. Il est possible de réaliser un alignement avec les motifs déjà présents sur le substrat, en face avant ou en face arrière, et avec une précision de quelques micromètres. La résine subit une transformation chimique sous l'effet du rayonnement UV, qui améliore (résine négative) ou dégrade (résine positive) sa solubilité dans une solution dite de développement (solution saline basique, solvant...).

La résine ainsi structurée n'est dans la majorité des cas pas destinée à rester sur le support. Elle sert elle-même de masque pour d'autres étapes comme le dépôt de métal (lift-off), la gravure humide ou la gravure sèche par plasma, etc.

ÉQUIPEMENTS DE DÉPÔT DE RÉSINE ET DE RECUIT

- Équipement automatique de dépôt de résine et de développement Falcon (SÜSS MICROTEC) Substrats de diamètre 4". Chargement par cassette, module d'étalement de résine avec EBR (enlèvement du bourrelet) et nettoyage de la face arrière, module de recuit (plaque chauffante et plaque froide), module de développement.
- Équipement semi-automatique de dépôt de résine et plaque chauffante FotoFab (S3) Substrats de diamètres 4", 6" et 8". Dispense automatique de résine, module d'étalement avec EBR (enlèvement du bourrelet), module de recuit (plaque chauffante et plaque froide).
- 2 postes dépôt de résine semi-automatique LabSpin8BM et plaques chauffantes HP8BM (SÜSS MICROTEC). Substrats de diamètres 4", 6" et 8".
- 4 plaques chauffantes programmables (PRAZITHERM).
- 7 étuves pour le séchage et le recuit des résines photosensibles (HERAEUS, MEMMERT).

ÉQUIPEMENTS D'ALIGNEMENT ET D'EXPOSITION UV

- Équipement d'alignement et d'exposition automatique MA150 (SÜSS MICROTEC). Substrats jusqu'à un diamètre de 6". Lampe 350W Hg, exposition Broadband, *i*-line (365 nm) et *g*-line (405 nm). Alignement simple et double face.

- Équipement d'alignement et d'exposition semi-automatique MA1006 (K&W). Substrats jusqu'à diamètre 8". Lampe 350W Hg, exposition Broadband. Alignement simple et double face substrats / substrats avant scellement pour les diamètres 4".
- Équipement d'alignement et d'exposition semi-automatique MA1006 simple face (K&W) Substrats jusqu'à diamètre 6". Lampe 350W Hg, exposition Broadband.
- Équipement d'alignement et d'exposition manuel MA6 simple face (SÜSS MICROTEC) Substrats jusqu'à diamètre 4" Lampe 350W Hg, exposition Broadband.

DÉVELOPPEMENT DES RÉSINES

- 3 paillasse de chimie pour le développement et l'enlèvement des résines photosensibles (SAPI EQUIPEMENT) Substrats jusqu'à diamètre 8".
- 4 microscopes optiques pour le contrôle du développement des résines : INM20 LEICA (propriété de Schlumberger), BH2 OLYMPUS, PARALUX, NS460 NACHET).



Figure 7 : Zone de 58 m² en classe 100 dédiée à la photolithographie et au scellement de substrats.

V. *Electrodéposition*

Des couches métalliques épaisses, de quelques micromètres jusqu'à plusieurs centaines de micromètres peuvent être obtenues par électrodéposition. Pour cela, un courant électrique est établi à travers une solution électrolytique contenant des ions du métal à déposer, entre une électrode métallique et le substrat. Ce dernier doit donc présenter une surface conductrice ; c'est pourquoi une couche mince métallique (appelée « seed layer ») y est préalablement déposée. Une seconde étape préalable est la réalisation par photolithographie d'un moule en résine épaisse. Le dépôt va donc s'effectuer seulement dans les parties où les ouvertures du moule laissent la couche métallique en contact avec la solution électrolytique. Si les ouvertures ont un fort rapport d'aspect, un traitement pour rendre sa surface hydrophile peut être appliqué pour aider à une meilleure pénétration de l'électrolytique jusqu'au fond du moule. Après le dépôt, le moule en résine est dissout et la « seed layer » est gravée. La vitesse et l'uniformité des dépôts dépendent des paramètres expérimentaux :



densité du courant, composition de l'électrolyte, vitesse d'agitation, type de polarisation (continue, pulsée), etc.

ESIEE Paris dispose d'un banc d'électrodéposition avec 4 cellules pouvant accueillir des substrats de diamètre 4", équipé de potentiostats Model 363 (PRINCETON APPLIED RESEARCH). Des dépôts de cuivre en modes pulsé et continu peuvent y être réalisés, ainsi que des dépôts d'or.

VI. Gravure humide

La gravure consiste à retirer une ou plusieurs couches de matériaux à la surface d'un wafer. Elle est appelée gravure humide lorsque qu'elle est réalisée en milieu liquide par immersion de l'échantillon dans une solution spécifique selon la nature de la couche à graver. Les opérations de gravure humide sont très fréquemment utilisées dans les procédés de fabrication des MEMS. Elles sont généralement mises en œuvre sur un masque en résine qui permet de protéger les zones où l'on souhaite conserver la matière, et ainsi transférer les motifs.

La gravure humide présente plusieurs avantages comme sa facilité de mise en œuvre. Cependant, comme pour les opérations de nettoyage, elle nécessite l'utilisation de produits chimiques dangereux et donc des manipulations sécurisées dans des paillasses de chimie adaptées. D'autres avantages de ce procédé sont une vitesse de gravure élevée et une bonne sélectivité. Cependant, il s'agit d'une gravure isotrope.

Les équipements ESIEE Paris permettent actuellement la gravure humide de couches minces métalliques (Au, Al, Ti, TiW, Cr, Ni) et d'oxyde de silicium SiO_2 avec du HF dilué ou tamponné BHF. Un système de gravure anisotrope du silicium (car gravure sélective selon les plans cristallins) par voie humide avec du KOH (Potasse) ou du TMAH (Tétraméthylammonium hydroxide) par exemple pour la libération de microsystèmes résonants de type poutre est également disponible.

VII. Gravure sèche par plasma

La gravure dite sèche, par opposition à la gravure humide, a lieu en milieu gazeux. Il s'agit d'une technique similaire, dans sa mise en œuvre, à la pulvérisation cathodique. En fonction de l'équipement et des paramètres du procédé (pression, puissance plasma, etc.), la gravure plasma sera assimilable à une gravure chimique ou à une gravure physique. Dans le premier cas, elle est due à la réaction des espèces chimiques présente dans le plasma avec la surface du substrat. Le substrat est gravé de façon uniforme dans toutes les directions (isotropie), donnant des profils de gravure semi-sphériques ce qui peut poser des problèmes lors de gravure de très petites dimensions. Dans le second cas, la gravure physique est engendrée par le bombardement de la surface du substrat par les espèces ionisées du plasma, gravure assimilable à la pulvérisation cathodique.

La gravure ionique réactive (RIE) est une association des deux modes de gravure qui permet à la fois d'obtenir des vitesses de gravure élevées du fait de la réaction chimique, de garantir des profils de gravure allant de profils isotropes à anisotropes (verticaux) et d'utiliser des masques en résines



classiques employées pour les étapes de photolithographie, protégeant les surfaces qui ne doivent pas être gravées.

Les équipements de gravure profonde DRIE (Deep Reactive Ion Etching) permettent de réaliser des gravures profondes anisotropes avec des flancs très verticaux pour des rapports d'aspect pouvant atteindre 100:1. Ces équipements comportent 2 sources RF (13,56 MHz). La première source appelée source ICP (Inductive Coupled Plasma) permet d'engendrer des plasmas de haute densité en augmentant le taux d'ionisation grâce à la polarisation RF d'une antenne (inductance) placée autour de la source. La seconde contrôle l'énergie des espèces ionisées arrivant sur le substrat. Les espèces transitent de la source ICP vers le substrat sous l'effet d'une polarisation continue.

Les procédés standards disponibles sur les équipements de gravure DRIE sont :

- Le procédé BOSCH qui alterne une phase de gravure du silicium par l'hexafluorure de soufre SF_6 et une phase de dépôt (ou passivation) produisant une couche très proche du Téflon du fait de la décomposition du C_4F_8 . La passivation des flancs de la gravure permet de conserver l'anisotropie.
- Le procédé cryogénique à environ $-110^\circ C$ qui permet de passiver les flancs de gravure par la condensation à très basse température au moyen des espèces présentes dans le réacteur comme l'oxygène (O_2), le fluor (provenant du gaz de gravure SF_6) et le silicium (produit de la gravure).

Les équipements de gravure plasma disponible à ESIEE Paris sont :

- 2 bâtis DRIE A601E (ALCATEL), un à chargement automatique compatible avec des substrats de diamètre 4" et un à chargement manuel pour des substrats jusqu'à 8", gaz : SF_6 , C_4F_8 , CHF_3 , He, O_2 . Gravure isotrope et anisotrope (procédé Bosch, cryogénique) du silicium, gravure de l'oxyde à grande vitesse, suivi de la gravure par caméra IR, caméra double spot et spectroscopie d'émission (JOBIN YVON - HORIBA).
- Un bâti de gravure RIE MG200S (Plassys, Figure 8), substrats jusqu'à 4", gaz : BCL_3 , CL_2 , N_2 , O_2 pour la gravure des métaux : Cr, Al et couches minces Al_2O_3 .
- 2 bâtis RIE NE110 (Nextral), dont l'un propriété de Schlumberger, compatibles avec des substrats jusqu'à 6" de diamètre, gaz : SF_6 , CHF_3 , CF_4 , Ar, O_2 , gravure isotrope et anisotrope du poly-Si, gravure Si_3N_4 , $SiO_2 < 500$ nm et verre, gravure sélective Si_3N_4 vs. poly-Si (upgrade propriété Schlumberger), plasma O_2 pour rendre hydrophile la surface.
- Équipement de gravure plasma Model 105 (Matrix), pour des substrats jusqu'à 6" de diamètre, plasma O_2 haute température ($> 200^\circ C$) pour le retrait des résines photosensibles et des polymères.



Figure 8 : Bâti RIE MG200S (Plassys) pour la gravure Cr, Al et Al₂O₃.

VIII. *Scellement de substrats*

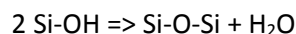
Des substrats de même nature ou de nature différente mais de mêmes dimensions peuvent être scellés en cours ou en fin de procédé, après alignement, en utilisant des techniques de scellement : soudure anodique, contact direct ou adjonction d'une couche intermédiaire (polymère ou métal). Ces procédés d'assemblage sont réalisés à l'échelle du substrat complet (Wafer Level Packaging).

SCELLEMENT PAR SOUDURE ANODIQUE

La soudure anodique permet de sceller un substrat en verre (verre dopé Bore et contenant du sodium) et un substrat en silicium (oxydé ou non) à une température voisine de 420°C (à cette température les coefficients de dilatation du verre et du silicium sont proches), sous vide ou sous atmosphère inerte et pression atmosphérique en appliquant une pression mécanique et une tension continue de plusieurs centaines de volts. Des assemblages plus complexes (Si/Verre/Si ou Verre/Si/Verre) peuvent être réalisés en une seule fois en utilisant une polarisation alternée de plusieurs centaines de volts permettant au procédé de scellement de s'effectuer sur chaque face du substrat central lors de chaque demi-alternance.

SCELLEMENT PAR CONTACT DIRECT

La soudure par contact direct permet plus de flexibilité en termes d'utilisation de substrats de natures différentes ou identiques. Le procédé de soudure directe du silicium (Silicon Direct Bonding) est obtenu en fonctionnalisant préalablement (par voie liquide ou par plasma) la surface d'un seul ou des deux substrats et en mettant les substrats en contact intime (pression mécanique). Le procédé de mise en contact se déroule généralement sous vide et est suivi d'une étape de traitement thermique (oxydant ou sec à 1050°C) qui permet de finaliser le scellement.



SCELLEMENT PAR COUCHE INTERMEDIAIRE

Il est également possible de sceller deux substrats en intercalant des polymères du type SU-8, polyimides, benzocyclobutène (BCB), etc. On dépose généralement le polymère sur un seul des deux substrats. Il pourra avoir préalablement subi une étape de photolithographie : le polymère ne recouvre alors plus la totalité de la surface du substrat et forme un cordon de soudure. Les deux substrats, sous vide ou sous atmosphère inerte et pression atmosphérique, et après traitement thermique (rampes et paliers de températures) sont mis en contact (pression mécanique). On parle alors de soudure adhésive. Elle permet de travailler à plus basse température mais n'est pas totalement hermétique.

SOUDURE EUTECTIQUE

Une autre technique de scellement consiste à réaliser un alliage Au-Si à une température voisine de 360°C par diffusion thermique sous une pression mécanique de l'or dans le silicium (ou autre couche). La soudure entre les deux substrats se produit lors de la phase de refroidissement. Ce type de scellement est appelé soudure eutectique. On obtient un scellement hermétique, et l'on peut en fonction de métal ou de l'alliage métallique baisser la température de scellement ($T < 300^{\circ}\text{C}$)

IX. *Caractérisation / Métrologie*

Pour la caractérisation des couches déposées et des dispositifs réalisés en cours et en fin de procédé, les salles blanches disposent de plusieurs équipements notamment optiques, mécaniques et électriques. L'équipement majeur est un microscope électronique à balayage (MEB) à effet de champ Neon 40 (Zeiss, Figure 9) doté d'une colonne à faisceau d'ions focalisé (Focused Ion Beam ou FIB) qui permet d'usiner des motifs nanométriques et de faire des analyses en coupe de structures (analyse destructive).



Figure 9 : Microscope électronique à balayage (MEB) à effet de champ Neon 40 (Zeiss) avec colonne FIB.



Pour les mesures d'épaisseur et de rugosité, sont disponibles un ellipsomètre spectroscopique E1200-0-VIS (Mikropack), un profilomètre mécanique Dektak 3ST auto 1 (Veeco), un profilomètre optique NT1100 (Wyko) et un interféromètre.

Pour les contrôles optiques, plusieurs microscopes optiques dont un infrarouge sont disponibles.

Un dispositif de mesure 4 pointes manuel et une station automatique de test sous pointe (K&W) permettent d'effectuer des mesures de courant, de tension, de résistance et/ou de capacité y compris avec une cartographie des puces sur wafer.

Enfin, un vibromètre laser (Polytec) offre des mesures optiques non destructives de vitesse et de déplacement pour les dispositifs MEMS.

X. Découpe, packaging et montage back-end

Les salles blanches ESIEE Paris comprennent une zone spécialement dédiée au montage back-end, avec accès par un sas indépendant.

L'opération de mise en boîtier d'une puce comprend les étapes suivantes :

- Découpe du substrat
- Report de la puce dans son boîtier - collage, brasure ou soudure eutectique
- Câblage filaire entre la puce et le boîtier

Pour la première phase, la découpe du substrat permet d'obtenir des puces individuelles après leur réalisation pleine plaque. Deux équipements de découpe 775 (Lulicke & Soffa) et découpe automatique DAD3350 (Disco) compatible avec des substrats jusqu'à 8" de diamètre sont disponibles.

Ensuite, les puces individuelles peuvent être montées sur les boîtiers par « pick & place » et le câblage par fil ou *wire bonding* réalisé avec un équipement « Ball/Wedge » type 4700AD (Kulicke & Soffa).

Une alternative consiste à utiliser la technique dite de « flip-chip » pour la manipulation ainsi que le montage de puces. Dans ce cas, des billes métalliques sont déposées préalablement sur les contacts de la puce puis celle-ci est retournée (d'où le nom de la technique) et positionnée en vis-à-vis des contacts sur le boîtier avant soudure. L'équipement disponible pour cette opération est de type T-3002-FC3 (Dr Tresky).



B) LA PLATEFORME COMMUNICATIONS RF, MICROONDES ET OPTIQUE

La plateforme communications RF, microondes et optique est un ensemble de plateformes qui peuvent fonctionner soit de façon autonome ou soit de façon collaborative. Chaque plateforme peut répondre à une demande unique et très spécifique.

Stations sous pointe, analyseur de réseau vectoriel 6GHz et 40GHz, analyseur de spectre 70GHz, testeur paramétrique de semi-conducteur, générateurs de signaux arbitraires 6GSa/s, oscilloscope temps réel 12GHz, analyseur de spectre optique, sources et modulateurs de 850nm à 1550nm, contrôleur de polarisation optique, nano-positionneurs, etc... permettent des mesures hyperfréquences, optiques, des radiocommunications numériques, de la RFID au LiFi, de la 5G aux réseaux de capteurs et systèmes de locations, du système aux études de composants RF, microondes et optiques.

Quelques exemples de caractérisation : systèmes de communication optique en espace libre, systèmes de communication multiGbps 4G, 5G et optiques, composants photodétecteurs rapides, cartographique de spectre d'émission de VCSEL, MEMS RF et optiques, solutions de packaging optique et hyperfréquences, capteurs électromagnétiques pour applications biochimiques, caractérisation d'amplificateurs de puissance RF et micro-ondes, banc de test de linéarisation d'amplificateurs de puissance, localisation de capteurs enfouis pour l'étude des matériaux granulaires, cartes de radio-logicielle.

C) LOGICIELS DE CONCEPTION DISPONIBLES

- ANSYS / COVENTOR / MEMS+
- Simulateur optique RSOFT (Synopsys)
- CAO Keysight - ADS (design RF et hyperfréquences), -SystemVue (développement d'architectures système et algorithmes couche physique), EMpro : simu électromag 3D ...
- NI/AWR : Labview, Labview com, AWR DE.
- Simulateurs logiques : Modelsim, MGC
- Simulateur logique (ModelSim, MGC)
- Simulateur mixte (Questa-ADMS, MGC)
- Outil de synthèse ASIC (RTL Compiler, CDS)
- Outil de placement-routage ASIC (SOC Encoutner, CDS)
- Outil de synthèse générique FPGA (Precision Synthesis, MGC)
- Outil de synthèse générique FPGA (Synplify, Synopsys)
- Outil de synthèse/placement-routage Altera (Quartus II, Altera)
- Outil de synthèse/placement-routage Xilinx (ISE, Xilinx)
- PCB (Allegro,CDS)
- Flot ASIC analogique (IC-virtuoso, CDS)



D) LA PLATEFORME SYSTEMES EMBARQUES

La plateforme systèmes embarqués est composée de deux plateformes de conception des systèmes temps réels distribués. Différents outils de programmation sont accessibles comme des cartes numériques programmables, des langages de programmation... Appareils de mesure, outils et logiciels de modélisation et prototype rapide (Matlab, DSP 28335, ...), banc de tests pour véhicules électriques, réalisations de maquettes... sont également disponibles.

Quelques exemples de réalisations : outil d'aide à la conception du logiciel temps réel embarqué (MoDEST), gestion optimale d'un véhicule électrique, conception des systèmes appliqués à la domotique.