

<p align="center"><b>Cahier des Clauses Techniques Particulières</b> en vue de l'achat d'un équipement de gravure en chimie chlorée</p>
---

## **I - Objet de la consultation**

L'équipement souhaité permettra de compléter la gamme des moyens de micro-usinage disponibles à la centrale de technologie MIMENTO de l'institut FEMTO-ST. Cet équipement devra être capable de graver les métaux (Al, Cr, Ni) en couches minces en chimie chlorée. Il devra également permettre le dépôt d'une couche passivante in-situ afin d'éviter, le cas échéant, le phénomène de corrosion engendré par la gravure du métal.

L'équipement devra être évolutif afin de permettre aux chercheurs et ingénieurs de FEMTO-ST d'explorer le plus de voies possibles, notamment l'exploration des gravures des matériaux de la colonne III-V (GaAs, InP...)

L'équipement devra être compatible avec le craqueur de gaz déjà présent à la centrale MIMENTO à savoir CENTROTERM CT-D 120I. L'offre devra spécifier si un nouveau craqueur est nécessaire en précisant ses spécifications.

L'équipement recherché devra être obligatoirement une machine neuve et capable de traiter des substrats de taille variable : depuis le morceau de quelques dizaines de mm<sup>2</sup> jusqu'au wafer 6 pouces. L'équipement sera fourni avec tous les kits et accessoires nécessaires à la réalisation de cette condition.

## **II.1 Cahier des charges techniques**

Nous exposons dans les paragraphes suivants les spécificités que nous exigeons pour cet équipement.

### **II.1.1 Aspects généraux**

Cette machine d'usinage par attaque plasma devra être capable de réaliser des gravures de métaux (Al, Cr, Ni, Cu, Pt) en couches minces (<300nm) en chimie chlorée sur différents substrats comme le niobate de lithium, le tantalate de lithium, le quartz et le silicium. La machine devra permettre d'obtenir une excellente verticalité des flancs (proche de 90°), avec un minimum de sous gravure et avec la meilleure sélectivité possible avec le substrat, pour l'ensemble des métaux gravés. La taille des motifs à graver ira de la centaine de nm à la centaine de µm (AsGa).

Il devra être également capable de graver un substrat de GaAs d'1µm d'épaisseur dans un premier temps et pour le futur de graver plusieurs dizaines de µm.

L'équipement proposé possèdera une chambre de gravure dédiée à la chimie chlorée. Le chargement des échantillons se fera de manière automatique avec un sas de chargement.

La chambre de gravure devra être équipée (en option) d'un porte-substrat ajustable en hauteur (distance inter-électrode), en précisant la méthode de réglage, afin de donner plus de possibilités aux chercheurs de la centrale de technologie de tester une variété de procédés.

Cet appareil sera installé dans une salle blanche et devra être compatible avec un environnement de salle blanche de classe ISO 7. Les dimensions de la machine seront fournies avec l'offre ainsi que tout élément ou accessoire additionnel nécessaire à son fonctionnement.

L'équipement sera interfacé avec une unité de pilotage permettant la gestion des principaux organes en visualisant leur état sur un écran (vannes, porte-substrats, introduction des gaz, générateur, vitesse de gravure etc...), et la gestion des sécurités. Le logiciel devra être convivial, facile d'utilisation, permettre la sauvegarde des procédés réalisés, et en option facultative, permettre une modification des paramètres en temps réel.

Afin d'évaluer les propriétés des usinages obtenues, le candidat devra préciser dans l'offre les propriétés des usinages obtenues et en particulier :

- Les paramètres de mesures post-gravure:
  - o La verticalité des flancs de gravure des métaux ( $90 \pm 10^\circ$ ) (à mettre dans tableau),
  - o La sélectivité de la chimie utilisée vis-à-vis des substrats (LNO, QTZ, LTO, Si),
  - o La valeur de la sous gravure (undercut), gravure sous le masque qui devra être la plus faible possible,
  - o La rugosité du fond des tranchées devra être minimale,
  - o Les facteurs d'aspect envisageable pour une ouverture de 2-10 $\mu$ m et 100-500 nm pour l'Al, Ni, Cr et AsGa,
  - o La sélectivité par rapport à un masque résine,
  - o L'efficacité de la passivation in-situ dans la chambre.

Ces valeurs devront être justifiées et argumentées à minima au moyen de photos MEB illustrant les possibilités de gravure de l'appareil pour chaque matériau (avec au minimum quelques photos significatives pour les procédés de base demandés précédemment).

Une attention particulière sera portée à la qualité du rapport.

Les performances annoncées devront pouvoir être reproduites sur des plaquettes tests lors de la réception de l'équipement sur site.

Il sera également demandé une liste de tous les matériaux pouvant être gravés dans l'équipement avec des images MEB.

### ***II.1.2 Performances des procédés attendues***

Cet équipement devra permettre de travailler sur des substrats allant de l'échantillon jusqu'au wafer de 150mm de diamètre, d'épaisseur allant de 200 $\mu$ m à 2mm. Les chercheurs de la centrale MIMENTO peuvent être amenés à travailler sur des substrats de 3, 4 et 6 pouces. Il devra être possible de passer facilement d'un type de substrat à l'autre, avec un minimum de manipulations de la machine et sans collage.

L'équipement devra être livré avec des procédés de base permettant d'obtenir les gravures suivantes:

- 1°) Gravure d'une couche métallique d'Aluminium de 200nm d'épaisseur,
- 2°) Gravure d'une couche de Cr de 200nm d'épaisseur,
- 3°) Gravure d'une couche de Ni de 200nm d'épaisseur,
- 4°) Gravure d'une couche de Cu de 200nm d'épaisseur,
- 5°) Gravure d'une couche de Pt de 200nm d'épaisseur
- 6°) Gravure d'une couche d'AsGa d'1  $\mu$ m d'épaisseur,

L'ensemble des procédés de gravure devront permettre d'obtenir la meilleure sélectivité possible vis-à-vis du masque en résine photosensible ou électrosensible pour un taux d'ouverture inférieure à 25%. La sélectivité vis-à-vis du matériau du substrat (niobate de lithium, et/ou de tantalate de lithium, et/ou de quartz et/ou de silicium) devra être également la meilleure possible. Le minimum de sous gravure sera exigé. Il faudra fournir la recette de gravure.

L'uniformité d'usinage sur un wafer de 100 mm devra être inférieure à 5 %.

Le wafer doit pouvoir être manipulé dès sa sortie de l'équipement sans risque pour les utilisateurs.

L'efficacité de la passivation sera vérifiée avec une mesure et une image MEB réalisée tout de suite après la gravure et la seconde un jour après. Ceci dans le but de permettre l'évaluation de la corrosion d'une couche d'Al, avec l'évolution de la taille de motifs dans le temps.

### **II.1.3 Spécificités exigées de l'appareil**

L'équipement de ce marché sera constitué des éléments suivants :

- Enceinte de gravure avec source plasma (l'offre précisera le type de source) et un SAS de chargement,
- Système de pompage de la chambre et du SAS,
- Porte-substrat avec générateurs RF,
- Système d'introduction des gaz,
- Système de mesure d'épaisseur *in-situ* (détection de fin d'attaque en temps réel),
- Interface de pilotage avec ordinateur complet.

La contrainte de flexibilité souhaitée impose de pouvoir facilement configurer la machine pour changer de taille de substrat. En particulier, la machine devra permettre d'usiner les matériaux décrits précédemment dans des conditions optimales sans modifications importantes de l'équipement et sans ouverture de la chambre de gravure. Il faudrait détailler la procédure pour le changement de taille de substrat.

#### **Enceintes de gravure**

La chambre devra être équipée d'une chemise chauffante ou de tout autre système permettant d'éviter la condensation des polymères sur les parois au cours des procédés de gravure.

L'offre devra préciser le type et la nature de la source employée pour la génération du plasma haute densité pour la chambre de gravure, en précisant les caractéristiques du générateur utilisé, mais également les différents matériaux constituant la chambre.

Le transfert entre la chambre de gravure et le SAS pourra se faire par un bras de transfert automatique en mono-wafer. Il faudra préciser le temps de transfert depuis la mise en place de l'échantillon dans le SAS jusqu'au début de la gravure.

#### **Système de pompage**

La chambre de gravure devra posséder son propre système de pompage, inclus dans l'offre, afin d'obtenir un vide satisfaisant en un temps réduit. Les types de pompe primaire et secondaire devront être clairement précisés dans l'offre. Les pompes retenues devront impérativement être compatibles avec les critères de maintenabilité fixés dans le paragraphe sur la maintenance (pièces détachées facilement disponibles et délai de réparation court).

#### **Porte-substrat**

La tenue des échantillons dans la chambre de gravure se fera sans risque d'endommagement du substrat notamment pour les wafers pyroélectriques pendant la gravure, soit par un clampage électrostatique, soit par un clampage mécanique, soit un mélange des deux et sans utilisation de moyens de collage. L'offre devra préciser si le système de clampage retenu nécessite ou non une métallisation face arrière du substrat. Le principe de clampage devra être clairement décrit dans l'offre, y compris tous les éventuels éléments annexes au clampage.

Le porte substrat devra pouvoir être refroidi ou chauffé à des températures s'échelonnant de 5°C à 40°C avec son propre chiller inclus dans l'offre.

➤ **Option obligatoire 1 – Porte-substrat ajustable en hauteur**

Un porte substrat ajustable en hauteur **devra être chiffré en option** en indiquant de combien de centimètres il sera ajustable et en précisant la méthode de réglage".

### **Introduction des gaz**

L'équipement devra être équipé de plusieurs lignes de gaz indépendantes avec chacune son propre régulateur de débit massique digital (Mass Flow Controllers). Le candidat devra préciser le temps de réponse des débitmètres massiques ainsi que le nombre maximum de lignes de gaz possibles et chiffrer le nombre de lignes gaz nécessaire pour les gravures des matériaux souhaités.

➤ **Option obligatoire 2 – Ligne de gaz additionnelle**

L'offre du candidat devra inclure en option n°2 le prix de l'ajout d'une ligne de gaz supplémentaire, y compris le régulateur de débit massique (Mass Flow Controllers) correspondant.

### **Interface de pilotage**

Une interface utilisateur conviviale et sécurisée devra être fournie avec l'équipement. Elle devra permettre de lancer des procédés de gravure en automatique, mais également de contrôler pas à pas l'ensemble des opérations. Une sauvegarde de l'ensemble des paramètres et opérations de gravure (pression, type et quantité de gaz, température, puissances, ...) devra être prévue. Un maximum des fonctions de la machine doit pouvoir être contrôlé par ordinateur. Le logiciel devra si possible permettre de faire varier les paramètres de gravure au cours d'un procédé, l'offre devra préciser la manière dont le logiciel permettra cette évolution des paramètres de gravure (variation par palier, linéaire, autres).

L'offre inclura l'ordinateur et les logiciels de contrôle et d'édition des procédés. Cette interface devra permettre de récupérer les données du process sur un logiciel de suivi des plaques et devra être compatible avec une éventuelle interconnexion à un logiciel de gestion à distance.

Le logiciel aura au minimum **trois modes** d'utilisation :

- Mode opérateur : sélection des recettes automatiques, modification du temps de gravure ou de la profondeur souhaitée, exécution des recettes.
- Mode ingénieur : procédé semi-automatique, création et modification de recettes.
- Mode administrateur : maintenance, pilotage manuel de tous les composants, création de comptes et affectation de droits aux utilisateurs.

### **Raccordement aux servitudes et sécurité**

La machine devra permettre des connections faciles et normalisées aux servitudes standard disponibles dans la salle blanche (air comprimé, azote sec, électricité, gaz procédés, exhaust, ...). Une liste détaillée des servitudes requises pour le fonctionnement de l'équipement devra être fournie avec l'offre. Toutes les servitudes spécifiques qui seraient non disponibles actuellement dans notre centrale de technologie (refroidisseur d'eau par exemple) devront être incluses dans l'offre.

L'équipement devra offrir une sécurité maximale pour les utilisateurs. L'offre devra spécifier les éléments de sécurité inclus dans l'équipement (vanne de sécurité sur les lignes de gaz, possibilité de purge, interlock, exhaust, ...). Il faudra aussi spécifier les besoins en craqueurs de gaz et la compatibilité avec notre craqueur CENTROTHERM CT-D 120I. Il faudra aussi spécifier la présence d'une gaz box, si elle est extraite, si elle est équipée de détecteurs de gaz ou si nous devons intégrer les nôtres. La machine devra être équipée d'un bouton d'arrêt d'urgence.

Toute machine neuve devra répondre aux exigences des articles R4311-1 et 4, et de l'article R4312-1 du code du travail ainsi qu'à la directive machine 2006/42/CE et tous textes modificatifs. Un matériel en provenance hors EEE, qu'il soit neuf ou d'occasion, est considéré comme neuf au sens réglementaire et devra donc répondre à ces exigences.

L'offre devra également préciser les dimensions et le poids de l'équipement.

En résumé, afin de pouvoir évaluer les spécificités techniques de l'équipement (critère n°3), l'offre devra comprendre l'ensemble des spécifications techniques de l'équipement :

- Type de matériau constituant la chambre, la présence ou non de liner et la facilité de leur changement, (3%)
- Vitesse de pompage pour la chambre (chambre de process et sas d'introduction) et temps de transfert, en combien de temps on peut faire un plasma, (2%)
- Type de régulation de pression, (informatif),
- Nombre, type et emplacement des jauges à vide sur la machine, (informatif),
- Nombre, puissance et fréquence des générateurs, (informatif),
- Facilité de changer de taille de substrat, (3%)
- Pas de collage des substrats 4 pouces avec de l'huile ou de la pâte thermique, (3%)
- Pouvoir modifier les paramètres de gravure en temps réel, nombre de recettes possibles, évaluation du logiciel, (3%)
- Temps de réponse des débitmètres massiques, (3%)
- Dimensions (3%), une machine compacte sera privilégiée.

La marque et le modèle des éléments constituant l'équipement (pompes, jauges à vide, générateurs, débitmètres massiques, ...) devront être clairement indiqués dans l'offre.

#### ***II.1.4 Maintenance et support technique***

L'équipement recherché étant destiné à des applications de recherche en partenariat avec des industriels, une importance particulière sera portée aux conditions de maintenance qui pourront être proposées par l'équipementier. Celui-ci devra démontrer dans l'offre qu'il est capable de garantir une très bonne réactivité en cas de panne.

Un détail des opérations de maintenance annuelle et de leur coût devra être inclus dans l'offre. En particulier l'offre détaillera le nombre de visites de maintenance préventive nécessaire au bon de fonctionnement de l'équipement, y compris pendant la période de garantie.

L'offre précisera également les conditions offertes pour la maintenance corrective (possibilité de prise en main de la machine à distance, hotline, ...) en précisant le coût d'une intervention corrective, hors de la période de garantie, et le délai standard d'intervention. Ce délai devra être inférieur à 72h, l'offre devra préciser le délai minimum d'intervention pouvant être proposé.

Les modalités des contrats de maintenance (préventive et corrective) proposés devront être détaillées, en particulier il devra être précisé si l'ensemble des éléments de l'équipement sont maintenus par le fournisseur ou si certaines parties comme les pompes, les générateurs ou d'autres éléments sont suivis par des intervenants extérieurs.

#### ***➤ Option obligatoire 3 – Contrat de maintenance***

Un **contrat de maintenance** annuelle incluant, à l'issu de la période de garantie, les visites de maintenance préventive préconisée (en précisant le nombre de jours) et trois à quatre visites de maintenance corrective/an pour un total de 3 jours de correctif par an, devra être proposé en option obligatoire par l'équipementier. L'offre devra inclure une explication sur les opérations réalisées lors des visites de maintenance préventives.

Les opérations de maintenance préventives devront être programmées suivant un planning régulier à définir en début d'année en accord avec la centrale de technologie. A l'issue de chaque intervention de maintenance un rapport devra être établi et signé par le responsable local de la maintenance de l'équipement

L'offre devra aussi préciser la nature du support technique sur le développement de procédé et sur la maintenance qui pourra être fourni à la centrale de technologie MIMENTO (nombre de personnes affectées à la maintenance, au support technique et au SAV, nombre de personnes impliquées dans la Recherche et le développement, localisation, expérience, ...).

### **II.1.5 Critères environnementaux**

L'offre devra préciser la consommation électrique de l'équipement sans et avec process (électrique et fluides) et décrire la démarche environnementale de l'entreprise.

### **II.1.6 Formation et documentation**

Une documentation précisant l'effet des différents paramètres sur le résultat de la gravure devra être fournie avec l'équipement. L'ensemble des documentations (documentation technique et documentation process) devront être fournies en version CD ou sur clé USB et en version papier compatible salle blanche.

L'offre devra inclure une formation sur le site de livraison (pour 3 personnes). Cette formation se fera à la réception du matériel, et devra porter sur les conditions d'utilisation, les procédures particulières (réglages, maintenance, influence des paramètres sur la gravure).

Une formation complémentaire sur les procédés de gravure et/ou sur la maintenance devra être également incluse dans l'offre pour les ingénieurs qui seront responsables de l'équipement (durée minimum d'une semaine pour 3 personnes).

### **II.1.7 Prestations de services demandées :**

La machine devra être neuve.

Impératif de livraison : 10 mois maximum, date de l'accusé de réception de commande.

Lieu de livraison : Maison des Microtechniques, 18, rue Alain Savary, 25000 Besançon.

Garantie du matériel commandé : 12 mois minimum, date de livraison, pièces et main d'œuvre. Si cela s'applique à son équipement, l'équipementier s'engage à communiquer au groupe technique de FEMTO-ST les modifications software (upgrade, nouvelle version, corrections, ...) et à les installer gratuitement pendant la période de garantie. Après la garantie, les améliorations seront négociées, par contre les corrections de bugs resteront gratuites.

Formation et documentation : Documentation et formation sur le site de livraison incluses. Cette formation devra comprendre une partie sur les procédés d'usinage et une partie sur la maintenance de premier niveau de la machine.

Le fournisseur devra détailler les conditions de formation incluse dans l'offre dans l'annexe C.

Livraison et Installation : La livraison et l'installation seront comprises dans l'offre. L'installation comprendra la validation des procédés d'usinage sur des échantillons tests. La livraison, le déchargement de la machine du camion (pas de quai de déchargement disponible), la mise en place en salle blanche dans les locaux de FEMTO-ST et la mise en route de l'équipement seront compris dans l'offre.

De manière générale, les équipements et l'ensemble de leurs périphériques devront être livrés propres et conditionnés de manière sérieuse et appropriée à une utilisation en salle blanche.

Les plateaux de transport, palettes et caisses d'emballage devront être adaptés aux poids et volumes des éléments afin d'assurer un transport sécurisé et éviter par la suite tout litige lié à un mauvais conditionnement.

## **III – Modalités de réception de l'équipement**

Ces tests conditionnent la validation de la période de vérification d'aptitude de l'équipement sur le site de FEMTO-ST. Tous les tests doivent être réussis pour que l'acceptation sur site soit validée.

Pour la réception de l'équipement, les tests suivants devront être réalisés :

ID	Contrôle de:	Commentaires
T-01	Vérification de la conformité de l'équipement avec les caractéristiques décrites dans le CCTP	
T-02	Vérification des performances de l'équipement	Vitesse de pompage, vide limite de la chambre et du SAS, transfert des wafers, ...
T-03	Test arrêt d'urgence et redémarrage	Après arrêt d'urgence, l'équipement doit pouvoir redémarrer sans intervention hardware
T-04	Chargement/déchargement	Chargement/déchargement successif de 5 wafers sans erreur

ID	Contrôle de	Commentaires	Critère d'acceptation
T-05	Gravure d'une couche d'Alu de 200nm d'épaisseur avec des motifs microniques	Sur wafer 4 pouces en LiNbO <sub>3</sub> ou Si avec un masque en résine UV, on devra vérifier l'absence de sous gravure, une verticalité proche de 90°, une non attaque du substrat sous la couche d'Al. Le wafer 4 pouces ne devra pas être cassé, ni collé sur un autre support. L'efficacité de la couche de passivation sera vérifiée.	Conforme aux valeurs indiquées dans l'offre

La réception au laboratoire sera effectuée avec des plaques test fournies par FEMTO-ST.  
Les caractérisations post-gravure seront réalisées au laboratoire avec les outils de caractérisation disponibles dans la centrale de technologie (MEB, Profilomètre, ...)

#### IV – Rappel des options obligatoires

L'offre devra inclure les options suivantes :

- 1) Un porte-substrat ajustable en hauteur.
- 2) Le prix des lignes de gaz additionnelles (avec MFC),
- 3) Un contrat de maintenance préventive annuelle,

A.....

Le, .....

Lu et approuvé  
L'entreprise, (cachet et signature)