

Cahier des Charges Microscope Électronique à Balayage CEA-SPEC, 10/03/2025

Objet

L'Atelier de Nanofabrication du CEA/DRF/IRAMIS/SPEC (ci-après appelé CEA), veut se doter d'un Microscope électronique à balayage (MEB) compatible avec le domaine de la microélectronique et à installer dans un environnement de salle blanche ISO6. Cet équipement sera principalement utilisé pour la mesure précise de dimensions sur des échantillons plans, dans le but de contrôler la qualité de lithographies optiques/électroniques, de gravures micrométriques/nanométriques, ou plus largement l'observation de nanostructures sous forme de couches minces. Il sera aussi utilisé pour évaluer les caractéristiques chimiques de couches minces et, optionnellement, les caractéristiques cristallographiques de monocristaux. Le système devra donc être équipé d'un outil d'analyse EDS/EDX à minima, Kikuchi (ou TKD ou EBSD) en option.

Il viendra remplacer un Philips XL30 SFEG acquis en 1999, utilisé aujourd'hui à la fois pour l'observation et la lithographie électronique de routine. Le MEB proposé devra donc avoir toutes les caractéristiques nécessaires pour pouvoir évoluer dans le futur, notamment pouvoir être utilisé comme outil de lithographie électronique grâce à un blanker rapide, une cage de Faraday pour mesurer le courant de faisceau, un contrôle de la déflexion du faisceau et de la platine motorisée par un module externe (de type « Pattern Generator », qui ne fait pas parti de ce marché). La présence de ports disponibles sur la chambre d'observation, pour le positionnement de dispositifs supplémentaires, sera aussi considérée comme un avantage.

Ce MEB devra être doté d'une interface logicielle conviviale et facile à utiliser, entièrement tournée vers l'acquisition d'images de haute résolution. Il devra aussi permettre de repérer très facilement des zones d'intérêt sur des échantillons pouvant aller jusqu'à 4in de diamètre et posséder une optimisation rapide et facile de la qualité d'image pour de la métrologie de précision (jusqu'à quelques nm).

Lexique

- Microscope électronique : microscope électronique à balayage avec acquisition d'images numériques
- Ordinateur : l'ordinateur de contrôle de l'équipement
- Logiciel : logiciel de contrôle du microscope électronique
- Equipement : microscope électronique + logiciel + ordinateur + meuble éventuel

Spécifications Générales

Le microscope électronique proposé devra permettre l'observation d'échantillons d'au maximum 10mm d'épaisseur et ayant des dimensions allant de quelques mm de côté à 100mm de côté (wafers standards et plaques de 4in). Les échantillons utilisés pourront être rigides ou flexibles, conducteurs ou isolants (wafers de Silicium, Saphir, verre, Kapton, polymères). La platine sur laquelle seront disposés ces échantillons devra être motorisée et permettre des mouvements dans toutes les directions (x, y, z) ainsi que la rotation et le tilt (R et T), avec suivi de la position ciblée lors du mouvement 5 axes (platine eucentrique ou compucentric).

La distance de travail pour l'observation (Working Distance = WD) devra être ajustable sur une plage allant jusqu'à 20mm (au moins). La plage de tilt de l'échantillon devra aller jusqu'à 45° minimum et la rotation couvrir une rotation complète (360°). Les limitations de Tilt en fonction de la WD devront être clairement indiqués dans l'offre.

Cette platine XYZRT devra permettre le repérage et l'enregistrement de positions sur échantillon, ainsi que le déplacement continu ou par sauts d'une distance précise sur toute la surface des échantillons. L'interface devra aussi permettre de déplacer la platine à l'aide de la souris soit en pointant un point précis à l'écran afin de le centrer sur la fenêtre de scan, soit en faisant glisser le point d'intérêt à l'aide de la souris (modes « Cliquer/centrer » et « drag »). Les modes de scan (vitesse, nombre de frame et moyennage) seront ajustables,

que ce soit pour la vue « live » ou la prise d'images. Les ajustements de focus, rotation d'image, « tracking » de point d'intérêt par rotation ou tilt de la platine, seront intégrés de façon pratique et fluide à l'interface de contrôle. La présence de modes d'ajustements automatisés pour le réglage du faisceau et la luminosité/contraste de l'image sera un atout.

La source d'électrons du microscope devra être de type à effet de champ (Field Emission Gun = FEG) avec une gamme de tension d'accélération pour l'observation comprise, à minima, entre 500V et 30kV. L'offre devra préciser, le courant d'émission avec le plus grand et le plus petit diaphragme pour différentes tensions (1, 5, 10, 30 kV), la stabilité du courant d'émission, la taille de sonde et la dérive de position typique du faisceau dans le temps (drift).

Le faisceau électronique de l'équipement et la qualité de conception de sa colonne devra permettre une résolution nanométrique dans toute la plage de tension d'accélération, et posséder différents modes d'observation : électrons secondaires (SE), rétrodiffusés (BSE) et mode mixte (SE-BSE) à minima. Le courant de sonde pourra être réglé à différents niveaux et devra atteindre des valeurs supérieures à 100nA.

L'offre devra inclure des possibilités d'imagerie sur matériaux diélectriques, utilisant, par exemple, la décélération de faisceau (idéalement avec des tensions « d'atterrissage » de quelques centaines d'eV) ou encore un dispositif de compensation de charges.

Un schéma de la source électronique avec ses lentilles éventuelles de focalisation, la position des différents détecteurs (SE, BSE, EDS) et explications sur les modes d'observations proposés seront annexés à l'offre.

Le MEB proposé devra permettre des grossissements couvrant, à minima, une plage allant de x25 à x500k (référence Polaroid). La taille du champ de vision à ces différents grossissements devra être maximisée (typiquement plus de 3mm Horizontal au plus faible grossissement). L'acquisition d'images sur l'appareil pourra se faire sous plusieurs formats (au choix .jpg, .png, .tiff à minima) et avec des résolutions ajustables, pouvant aller au-delà de 5 Mégapixels par image. L'image venant du microscope sur les écrans d'affichage devra dépasser 25cm de hauteur sans présenter d'aberrations (effets Moirés ou aliasing, keystone, etc.).

L'affichage devra permettre de voir 1, 2 ou 4 prises de vue en simultané sur le même écran.

Le chargement des échantillons pourra se faire par ouverture de l'enceinte, avec des temps de pompes inférieurs à 5min avant la prise d'images. Un chargement par un sas (Airlock) sera présenté en option, en indiquant clairement ses temps de pompage, de transfert et ses limitations sur les tailles d'échantillons pouvant être insérés de cette façon. Le soumissionnaire fournira des explications détaillées sur le changement des échantillons, le principe de transfert et les supports disponibles. Une attention particulière sera portée aux mesures prises afin de prévenir les collisions d'échantillons à l'intérieur de l'enceinte lors des chargements et des déplacements.

L'appareil devra être fourni avec, à minima, un support pour wafer 2in et 4in, ainsi que pour des échantillons multiples (fixés sur des supports standards de type « pin stub » de 12.7mm de diamètre). En plus de ces différents supports, le MEB sera livré avec un standard de métrologie (pour vérification/calibration de l'appareil) et un échantillon de référence constitué de nanoparticules d'or sur carbone (pour vérification de la qualité d'image et de la résolution ultime).

Spécifications Particulières

Système de navigation : le MEB proposé sera équipé d'une caméra numérique permettant de prendre un cliché du porte échantillon avant ou après insertion dans la chambre d'observation. Celui-ci permettra de repérer facilement les échantillons et/ou les sites d'intérêt sur ces échantillons, d'enregistrer leurs positions et de s'y déplacer (pour la prise d'image au microscope électronique) grâce à la platine motorisée, en pointant directement sur cette image. La plupart des échantillons observés ayant un poli miroir, l'éclairage pour la prise de ces photos devra éviter l'utilisation d'une lumière directe.

« EBL ready » : Le MEB proposé devra être configuré pour pouvoir évoluer aisément dans le futur vers un système de lithographie électronique. Cela implique un « blanker » rapide (pouvant être mis en fonction sans avoir à

démonter la colonne), la possibilité de se brancher sur le MEB à l'aide d'un module externe (de type « Pattern Generator », ne faisant pas partie de ce marché) afin de contrôler le faisceau et la platine motorisée pour exposer des résines électrosensibles. Le microscope devra aussi offrir la possibilité de mesurer le courant de sonde dans toutes les conditions d'exposition/observation. La fonction « EBL ready » demandée implique aussi, évidemment, une bonne stabilité de faisceau (tant sur le courant d'émission que la dérive de position dans le temps) et une bonne précision de déplacement de la platine.

EDS/EDX : Le MEB proposé devra être équipé d'un système d'analyse élémentaire qualitative, accompagné de son logiciel de traitement des données, permettant l'acquisition de spectres EDS de zones définies à partir des commandes propres du microscope (système dit EDS ou EDX pour « Energy Dispersive X-ray Spectroscopy »). Cette analyse EDS devra permettre la détection des éléments de la classification périodique à partir du Béryllium ($Z=4$), avec une précision meilleure que 0.5%wt. Le détecteur devra avoir une surface d'au moins 30mm², être refroidi par effet Pelletier et le mouvement d'insertion/retrait de la sonde devra être possible.

Le fait que cet outil d'analyse élémentaire soit intégré à l'interface d'imagerie du microscope électronique elle-même sera considéré comme un avantage.

La présence de ports supplémentaires sur la chambre d'observation (et le SAS présenté en option), pour le positionnement de dispositifs supplémentaires ou l'ajout d'un Plasma Cleaner sera considérée comme un avantage.

La possibilité de faire des analyses de type Kikushi afin de repérer l'orientation d'un monocristal devra être présentée en option.

Installation

Ce microscope électronique sera, dans un premier temps, placé dans un laboratoire de 20m², sur dalle béton, au rez-de-chaussée du bâtiment 772 du Service de Physique de l'Etat Condensé (SPEC). Courant 2026, il sera déménagé dans une nouvelle construction (fin des travaux prévue mi-2026) au RDC du même groupe de bâtiment, à l'intérieur d'une salle blanche ISO6 de 400m² et placé sur une dalle anti-vibration partagée avec d'autres équipements sensibles. L'équipement devra donc être adapté à un environnement Salle Blanche de classe ISO6. L'emprise au sol du microscope ne devra pas dépasser 2.5m x 3m (hors ordinateur de contrôle et périphériques) ; la dimension de la dalle anti-vibration partagée avec deux autres colonnes électroniques sera de 2.45m x 9.25m.

La livraison se fera sur un quai de chargement situé au RDC du même groupe de bâtiments. L'appareil livré sera ensuite roulé sur une centaine de mètres à l'intérieur du bâtiment. Les différentes portes à passer pour accéder au site d'installation ayant un dégagement maximum de 1.5m de largeur x 2m de hauteur, aucune caisse livrée ou élément séparé de l'équipement ne devra dépasser ces dimensions.

L'offre devra comprendre toutes les dimensions et poids de l'appareil et de ses utilités (pompes, chiller, bureau, PCs), ainsi que les recommandations générales pour son installation (besoins en électricité, air comprimé, azote, niveaux de vibration, etc.). Le CEA sera en charge de fournir cet environnement. Le titulaire sera en charge de l'installation de l'équipement.

Le délai de livraison donné dans l'offre fera partie des critères d'évaluation.

Ordinateur/Logiciel

Le logiciel de contrôle du microscope électronique devra être compatible avec un fonctionnement multi-utilisateurs. En plus des fonctions proposées par le logiciel, ses facilités, sa fluidité et sa simplicité d'utilisation seront un critère important de choix. L'ergonomie sera évaluée en fonction des options disponibles pour le repérage et la prise d'image haute résolution sur échantillon. Seront appréciés la facilité de navigation entre le cliché de repérage du porte échantillon et la prise de clichés du microscope électronique pour la recherche rapide de sites d'intérêt, le déplacement à l'aide de la souris et le zoom à un endroit précis jusqu'à de hautes résolutions pour y effectuer une mesure de taille de motif sous-micrométrique et nanométriques (lignes métalliques de

l'ordre de 100nm et nanoparticules d'or de l'ordre de 10nm). Pour la métrologie, la possibilité de modifier à façon les légendes, commentaires, contours et positions d'annotations sur l'image, le fait de pouvoir positionner et déplacer des traits ou des contours de mesures avec affichage de la mesure précise correspondante fera partie des critères importants de la note technique, au même titre que la facilité de réglage du faisceau (alignement, stigmatisme, focus, luminosité et contraste).

La facilité d'utilisation de l'EDS/EDX et la fluidité du passage entre la prise d'image au microscope électronique et la mesure de compositions élémentaire des échantillons observés (mode EDS/EDX) feront partis intégrantes de la note technique. Notons en particulier la capacité à générer rapidement des rapports de mesures (éléments trouvés, spectres, composition en % atomique et/ou massique) sur ces analyses élémentaires.

Aussi, pour pouvoir apprécier au mieux la note technique sur l'interface utilisateurs, les différentes fonctions offertes par le logiciel d'acquisition et de traitement d'images devront être clairement décrites par le soumissionnaire ainsi que les fonctions avancées (telles que le stitching d'images par déplacement de la machine, l'utilisation de script pour automatiser des tâches, etc.).

Plus largement, il sera important pour le soumissionnaire de remplir le tableau récapitulatif des caractéristiques de l'équipement proposé, présenté en Annexe 1, qui sera utilisé pour départager les offres.

Tests

En plus des caractéristiques annoncées, des tests devront être effectués par le soumissionnaire sur des échantillons (cf annexe 2) fournis par le CEA sur demande des soumissionnaires (envoi par la poste) afin d'évaluer les performances de l'équipement proposé. Les résultats de ces tests seront à joindre à l'offre du soumissionnaire.

Ces tests consisteront dans la prise de clichés sur un circuit électronique de référence (fabriqué au CEA) comportant des motifs de tailles millimétriques, micrométriques et nanométriques.

Le détail de ces tests est présenté en Annexe 2.

Ces tests seront répétés sur l'équipement choisi et installé au CEA pour validation et acceptation de l'équipement.

Garantie

La garantie sera d'une durée de 2 ans à compter de la réception du MEB.

Une assistance sera proposée en cas de besoin des utilisateurs. Une réponse du titulaire sera attendue sous 24h suivant la demande du CEA (mail et / ou téléphone).

S'il est nécessaire d'intervenir sur site, le délai d'intervention sera de 6 jours ouvrés suite à la demande du CEA.

Maintenance

Des prestations de maintenance comprenant le remplacement de « consommables » sont prévues au marché, pour une durée d'un an faisant suite à la période de garantie. Cette maintenance comprend :

- Une visite de maintenance préventive annuelle
- Des prestations de maintenance corrective sur devis préalables

En particulier, le coût de remplacement des pompes à vide, du bloc filament, du bloc diaphragme, de la camera de vue sur l'enceinte, du chiller et de la platine motorisée devront être indiqués dans le cadre d'un scénario précisé dans le règlement de consultation. Le soumissionnaire indiquera aussi dans son offre la durée de vie typique de ces composants et leur délai de livraison. Cette information sera utilisée pour l'analyse du prix des offres.

Documentation

Les manuels d'utilisation (à minima en version numérique), les schémas mécaniques du système, la documentation logicielle et les procédures de remplacement de pièces sur l'appareil seront fournis avec l'équipement.

Formation

Une formation à l'utilisation et l'entretien de l'Équipement, pour environ 4 personnes (chercheurs et ingénieurs) devra être réalisée par le Titulaire lors de l'installation de l'Équipement sur le site. Le soumissionnaire devra préciser le montant de cette prestation dans son offre.

ANNEX 1: Spécifications Générales

Système	Taille (L cm x l cm x H cm)	Poids (kg)	Système anti-vibration intégré	Contraintes vibratoires pour le lieu d'installation	Ports supplémentaires disponibles
	Pressions d'opération typiques (colonne et chambre)	Temps de pompage Chambre	Temps de pompage SAS	Spécification « EBL ready »	Garantie (Années)

Colonne	Type de pointe	Gamme d'accélération	Résolution à 1, 15 et 30kV	Courant maximum à 1, 15 et 30kV	Modes spéciaux (décélération, polarisation platine, etc.)
	Stabilité en courant pA/h	Stabilité en drift nm/h	Fast blanker	Mesure de courant	Connectique pour le contrôle du faisceau

Mode / DéTECTEURS	#	Type (SE, BSE)	Position (in-lens, dans la chambre, ...)	Nombre de cadrans	Résolution	Mode spécial
	1					
	2					
	3					
	4					

Platine Moto- risée	Taille max d'échantillon (mm x mm x mm)	Course XYZ (mm x mm x mm)	Précision XY Z (nm)	Vitesse de déplacement XY (mm/s)	Eucentrique ou compucentrique
	Rotation et tilt max (°)	Commandes de déplacement	Connectique pour la commande de la platine	Caméra latérale	Garantie (Années)
		Clavier Console Souris	Oui Non	Oui Non	

PC	Processeur (ID)	Type de Disque Dur	Taille de Disque Dur (Gb)	Mémoire vive (Go)	OS (ID)

	Nbre de ports USB	Carte Graphique (ID)	Taille(s) d'écran(s) [H] x [V] (cm)	Résolution(s) d'écran(s) (px) x (px)	Garantie (Années)

EDX	Modèle	Taille de détecteur	Résolution (eV)	Eléments détectables	Intégré au logiciel du MEB
					Oui Non
	Scan en mode photo (cartographie), Tps typiques d'acquisition		Scan en mode ligne/point, Tps typiques d'acquisition		

Logiciel de contrôle	Alignement automatique	Stigmatisme automatique	Focus automatique	Luminosité/Contraste automatique	Réduction de bruit (par ex. compensation de drift)
	Oui Non	Oui Non	Oui Non	Oui Non	
	Système de navigation (photo du porte-échantillon)	Navigation en système de coordonnées absolu	Navigation en coordonnées corrigées ¹	Déplacement par steps	Assemblage d'images 2D
	Oui Non	Oui Non	Oui Non	Oui Non	Oui Non
	Déplacement sur image (cliquer centrer, drag, etc.)	Métrologie (mesure d'aire, correction en tilt)	Formats d'image (jpg, tiff, png, bmp, ...)	Taille maximale d'image (px * px)	Champ de vision à x50 de grossissement et WD de 10mm
	Enregistrement des paramètres d'observation	Duplication des paramètres d'observation à partir d'une image	Programmation de blocs de fonctions pour automatisation	Interface EDX/EDS intégrée	Possibilité de mises à jour (années)
	Oui Non	Oui Non		Oui Non	

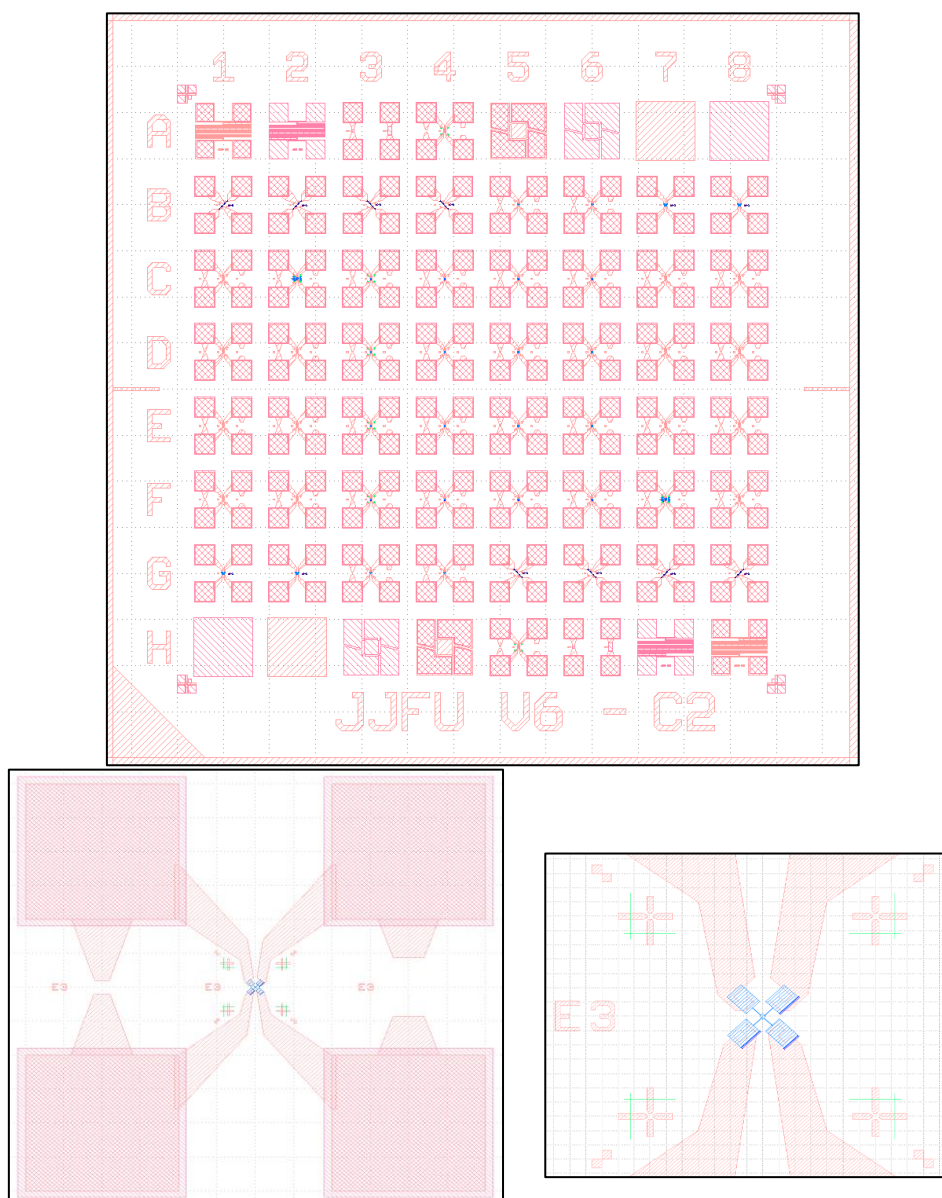
Service après-vente	Durée	Support à distance	Délai de réponse (h)	Distance du point de service (km)	Délai d'intervention (j)	Possibilité de coupler maintenance préventive et curative
Sous Garantie		Oui Non				Oui Non
Hors Garantie		Oui Non				Oui Non

¹ Possibilité d'avoir un système de coordonnées relatif (avec choix de l'origine) et tenant compte de l'angle de rotation de l'échantillon

ANNEXE 2: Tests de performance

A. Chip de Silicium de 8.2mm x 8.2 mm

1. Un chip de 8.2mm x 8.2mm, fixé sur une plaque de Silicium de 2in, sera à observer. Il s'agit d'un échantillon de Silicium recouvert d'une couche de 300nm de SiO₂ sur lequel ont été fabriqués des circuits microélectroniques (donc recouvert des motifs micrométriques et sous-micrométriques).
2. Un cliché du montage sera pris grâce à la caméra de navigation du microscope
3. Un cliché du centre d'une sous-cellule de 60µm x 60µm contenant une Jonction Josephson (circuit en croix apparaissant en bleu sur la 3^e image ci-dessous) sera pris à 1, 15 et 30kV avec les différents détecteurs disponibles. Le numéro de la cellule à observer sera donné lors de l'envoi des échantillons.



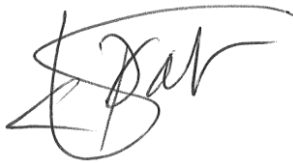
4. Sur un de ces clichés, des mesures de largeur de motifs seront effectuées à différentes positions et sauveées en format image. Une mesure d'aire de la zone d'intérêt (croisement des deux motifs carrés au centre de l'image) sera aussi effectuée et enregistrée en format image.

5. Une image EDX de la zone sera aussi enregistrée avec les différents éléments trouvés

B. Nanoparticules d'or

1. Des nanoparticules d'or, déposées dans un coin de l'échantillon du test A, seront à repérer et observer à un grossissement de x500k. La position précise de cette zone d'intérêt sera donnée lors de l'envoi des échantillons.
2. Une image EDX de la zone sera aussi enregistrée avec les différents éléments trouvés
3. Les mêmes nanoparticules seront déposées sur un substrat de Saphir. Elles seront aussi à repérer et observer à un grossissement de x500k, et une image EDX de la zone sera aussi enregistrée avec les différents éléments trouvés.

La performance de l'équipement sera jugée sur la qualité des différents clichés, la facilité avec laquelle ils peuvent être réalisés (l'offre devra bien détailler toutes les opérations effectuées pour obtenir les clichés présentés) et le temps nécessaire à la prise d'image ou la réalisation d'opérations de métrologie sur les clichés enregistrés.



Sébastien Delprat, 22 avril 2025