

La microscopie confocale : un support de formation en micro- et nano-électronique au CCMO, pôle CFM de Rennes

L. Pichon^{a,b}, J. P. Landesman^b, H. Lhermite^{a,b}

^a Pôle CNFM de Rennes (CCMO), Université de Rennes 1, Rennes, France

^bUniv Rennes, CNRS, IETR [Institut d'Electronique et des Technologies du numéRique]
- UMR 6164, F-35000 Rennes, France

^c Institut FOTON – UMR6082, F-35000 Rennes, France
Contact email : laurent.pichon@univ-rennes1.fr

L'article présente de l'apport de la microscopie confocale dans les formations en micro- et nano-technologies proposées par le CCMO (Centre Commun de Microélectronique de l'Ouest), pôle CFNM de Rennes. Un focus particulier est porté sur l'observation et la caractérisation à l'échelle micro et nanométrique d'objets (composants, nanofils,...) ou de systèmes microélectroniques (architecture physique de microprocesseurs).

I. Introduction

La course à la miniaturisation en microélectronique intégrée a conduit au développement d'outils de fabrication et de caractérisation adaptés aux dimensions des briques de bases constituants les systèmes électroniques toujours plus performants. Ainsi afin de répondre aux objectifs fixés par les roadmaps successives de l'industrie des semiconducteurs (1) de nouveaux procédés de synthèse de matériaux et de fabrication en nanotechnologie avancée sont en cours de développement par les centres de recherche de l'industrie de la microélectronique. L'obtention de matériaux à des niveaux d'échelle toujours de plus en plus bas a nécessité le développement des méthodes de dépôts et de synthèse spécifiques, et de mise en forme (outils lithographiques adaptés) à forte valeur ajoutée. Parallèlement, des moyens de contrôles ou de caractérisations physiques (eux aussi toujours de plus en plus sophistiqués) sont aussi nécessaires. Parmi ceux-ci citons les systèmes de visualisation optique basée sur la microscopie confocale (2).

L'analyse fine des caractéristiques de surface des matériaux et des composants est une partie de plus en plus importante de la gestion de la qualité de fabrication de dispositifs nanométriques. Dans ce cas la microscopie confocale est adaptée. En effet, dans le passé, les instruments de mesure de la rugosité de surface à l'aide d'un stylet qui mesuraient la forme par contact direct avec l'échantillon étaient largement utilisés. Cependant, au regard du nombre croissant d'échantillons à contrôler à l'aide de tels instruments, notamment les échantillons fragiles, tels que les films, ou les échantillons dont les variations de hauteur sont inférieures au diamètre du stylet, des techniques de mesure de surface plus précises, non destructives et sans contact sont devenues nécessaires. Ainsi, pour répondre à cette demande la microscopie confocale laser permet d'effectuer une mesure tridimensionnelle précise de la forme de la surface d'une grande variété d'échantillons en utilisant une technique sans contact sous atmosphère ambiante.

L'avantage d'un microscope confocal par rapport à un microscope optique classique est de réaliser des images de très faible profondeur de champ (environ 40 nm). En positionnant le plan focal de l'objectif à différents niveaux de profondeur dans l'échantillon, il est

possible de réaliser des séries d'images à haute résolution à partir desquelles on peut obtenir par reconstitution une représentation tridimensionnelle. L'objet n'est donc pas directement observé par l'utilisateur ; celui-ci voit une image recomposée.

II. Contexte et environnement technologique

Depuis de nombreuses années le CCMO (Centre Microélectronique de l'Ouest), pôle CNFM (3) de Rennes forme des étudiants des filières de la physique appliquée et de l'électronique aux technologies microélectroniques. Les formations proposées par le CCMO se déroulent sous forme de travaux pratiques en salle blanche. Elles s'adressent à des cursus de formations initiales diplômantes des établissements d'enseignement supérieur (universités, écoles d'ingénieurs) du Grand Ouest.

Le CCMO dispose d'une salle blanche commune avec celle de l'Institut d'Electronique et des Technologies du Numérique (IETR UMR 6164). Les moyens technologiques et de caractérisation de cette salle blanche sont aussi partagés avec ceux de la centrale de technologie Nano-rennes (4) (site IETR), plateforme de technologie de proximité du réseau Renatech créée en 2005. Récemment, une nouvelle plateforme en cybersécurité matérielle (CYBER-ELEC) a été créée, et est hébergée au département OASIS (Organic And Silicon Systems) de l'IETR dans un local attenant à la salle blanche. Le financement de CYBER-ELEC (CPER SSI-Sécurité des Systèmes d'Information - 2015-2020) a permis l'acquisition d'un microscope confocal Lext OLS5000 de chez Olympus (5) installé dans cette salle blanche (fig. 1). Celui-ci est disponible à la fois pour les utilisateurs de Nano-rennes, les chercheurs/enseignants-chercheurs de l'IETR et les étudiants en formation en salle blanche au CCMO.

L'ensemble CCMO/Nano-rennes/CYBER-ELEC constitue donc un environnement de proximité de choix pour la formation et la recherche.

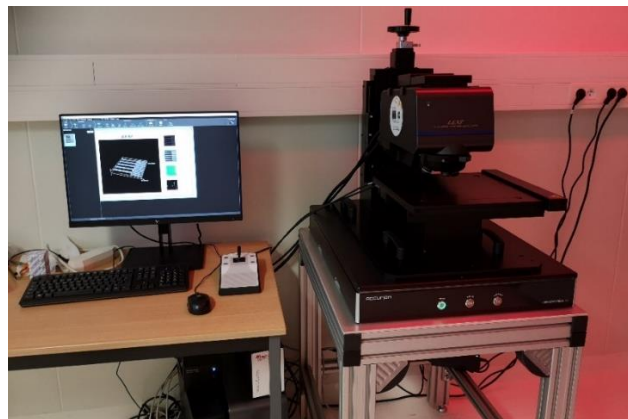


Fig.1. Microscope confocal Lext OLS5000 de chez Olympus dans la salle blanche de l'IETR.

III. Exemples de contributions aux formations

L'offre de formation du CCMO comprend un panel de travaux pratiques (TP) allant de la fabrication de composants électroniques classiques (diodes, transistors MOS...), aux capteurs, ainsi qu'à la synthèse et la caractérisation de nano-objets. Pour l'ensemble de ces TP, des étapes de contrôles (optiques) voire d'analyses physiques (de l'état de surface entre autres) sont nécessaires. Le plus souvent de tels contrôles nécessitent l'usage d'un microscope optique et d'un outil spécifique pour le(s) paramètre(s) physique(s) à analyser

(profilomètre à stilet, microscopes AFM ou électroniques...). Le microscope confocal a l'avantage de permettre ces deux possibilités à un niveau d'échelle relativement bas, avec une saisie d'image quasi directe. De plus sa prise en main est aisée (observation en mode optique et logiciel de traitement d'image 3D). Ainsi l'usage d'un tel équipement à disposition au CCMO constitue un outil d'analyse complémentaire intéressant en support aux TP dispensés dont des exemples sont donnés dans ce qui suit (fig. 2).

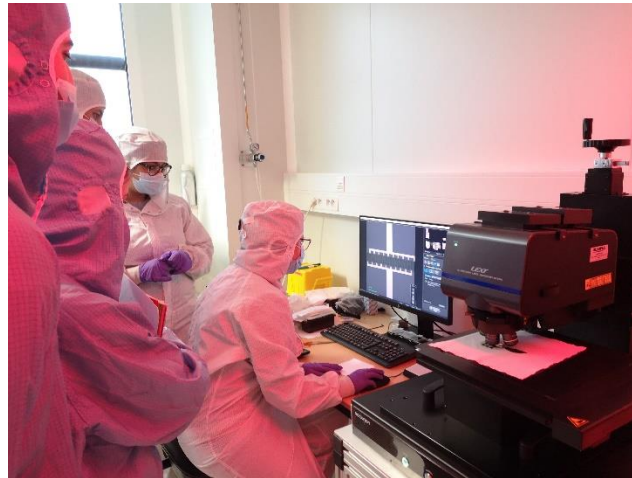


Fig.2. Etudiants de Master lors d'un TP de nanotechnologies en salle blanche : visualisation et caractérisation optique du dispositif étudié (résistance électrique à base de nanofils de silicium).

Analyse et contrôle de couches minces lithographiées

La formation en salle blanche permet aux étudiants une initiation à l'utilisation des outils de technologie microélectronique (réacteurs de dépôts, outils de lithographies, gravure...) pour la fabrication de microdispositifs. Les étapes intermédiaires de fabrication incluent le dépôt d'un matériau et la réalisation de motifs (photolithographie + gravure) associés.

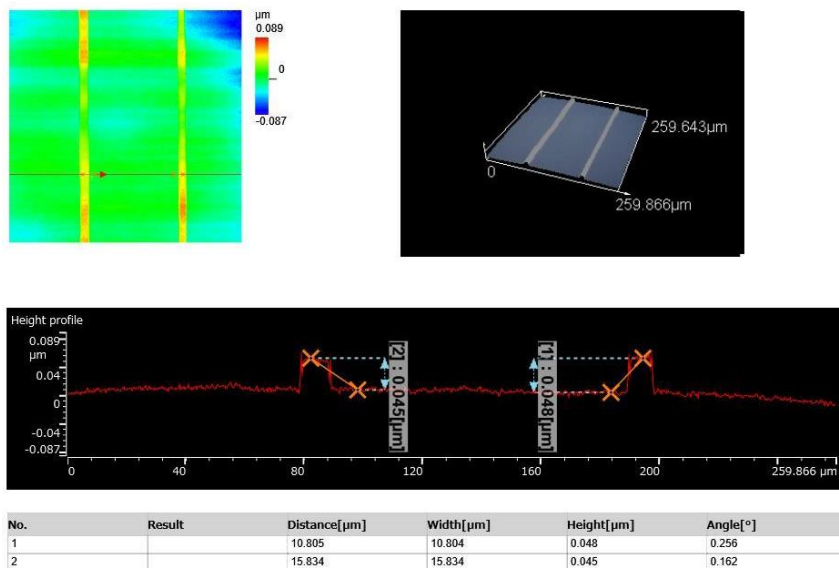


Fig.3. Observation et analyse 3D et par profilométrie des rubans nanométriques d'aluminium sur substrat de silicium.

L'analyse par imagerie en microscopie confocale est alors un bon moyen de contrôler la qualité de ces étapes (état de surface, homogénéité en épaisseur,) comme le montre la figure 3, du contrôle en 3D et par profilométrie d'un dépôt en couche mince d'aluminium évaporé sur un substrat de silicium pour la réalisation de nano rubans.

Analyse 3D d'un transistor MOSFET

Lors d'un TP dédié à la fabrication d'un transistor MOSFET fabriqué en salle blanche par des étudiants en formation au CCMO (fig. 4), des contrôles visuels sont nécessaires à différents niveaux de fabrication afin d'évaluer la qualité d'une étape de fabrication (erreur d'alignement, qualité de développement, gravure,...). En complément à ces contrôles visuels par microscopie optique classique, le microscope confocal permet une analyse plus fine par topographie tridimensionnelle de la structure en cours de fabrication, la reconnaissance et l'identification des zones spécifiques ainsi que les différents matériaux associés à la fabrication du transistor.

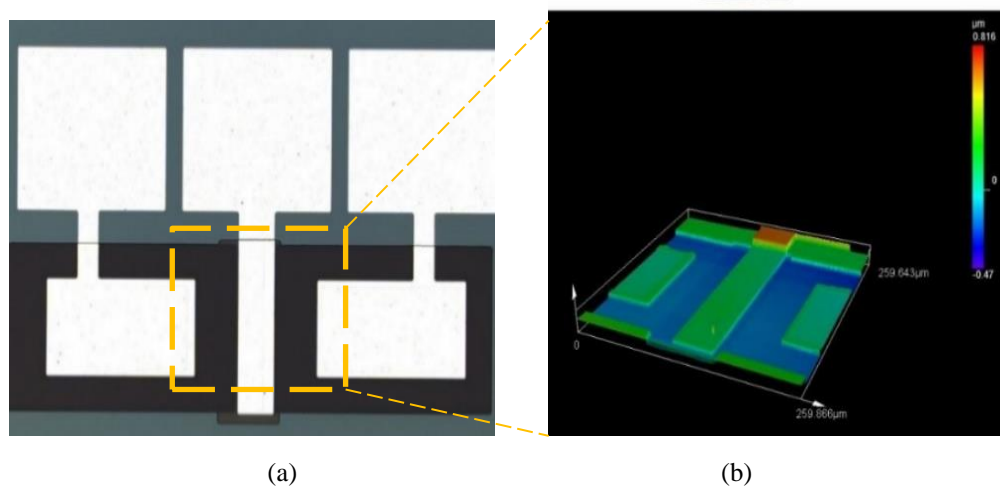


Fig.4. Vue 2D (a) et 3D (b) d'un MOSFET (à canal N) fabriqué par des étudiants de master en formation au CCMO.

Analyse 3D d'une mémoire RAM

Le niveau d'échelle d'observation 3D du microscope confocal peut s'avérer être un moyen très performant de prospection dans le cadre d'études de retro-engineering (rétro-conception d'un plan mémoire par exemple), pour le repérage physique d'une zone d'intérêt (mémoire RAM par exemple, fig. 5) de circuits électroniques dédiés au stockage de données sensibles (clef secrète), notamment dans le cadre d'études en cybersécurité matérielle de la robustesse et de l'immunité des circuits soumis à des attaques (injection de fautes...). La nouvelle plateforme CYBER-ELEC développant des activités de recherche dans ce domaine et la création de l'EUR CYBERSCHOOL à l'université de Rennes 1 en 2019 constituent une opportunité pour proposer de nouvelles formations au CCMO en lien avec ces problématiques à un vivier d'étudiants potentiellement intéressés par le volet matériel de la cybersécurité.

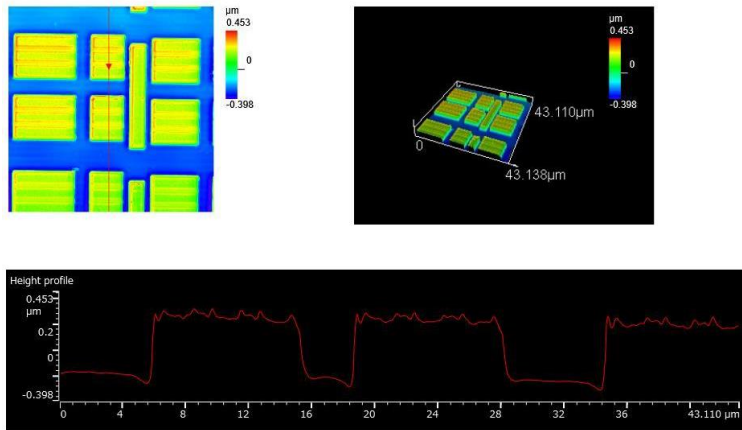


Fig.5. Observation d'une mémoire partie de mémoire SRAM : vue générale en 2 D, analyse en 3D de la topographie locale, et profilométrie.

Caractérisation électrique d'un nanofil de silicium à l'aide nano-robots

Grâce au projet IDEFI FINMINA (6) le GIP CNFM (3) a permis le co-financement de nano-robots développés par la société IMINA technologies (7) pour la mise en place d'un TP au CCMO sur la manipulation de nanofils de silicium (8) présenté lors des 14^{es} journées pédagogiques CNFM de Montpellier (29 nov-1^{er} dec 2016). Chaque nano-robot est piloté par un module électronique d'interface contrôlé par ordinateur, avec une résolution de déplacement ajustable allant du micromètre au nanomètre. La manipulation à ce niveau d'échelle est particulièrement adaptée sous microscopie électronique. Cependant, l'utilisation d'un tel microscope n'étant pas triviale pour un TP, une alternative serait d'utiliser le microscope confocal. En effet, les performances de ce microscope rendent possibles l'observation et le positionnement des nano-pointes des robots aux extrémités d'un nanofil isolé (fig. 6). L'électronique de commande des nano-robots permet un interfaçage avec un analyseur Keithley 2450 pour la commande et la saisie de mesures Courant-Tension du nanofil (voir fig. 7). Un tel dispositif expérimental peut s'avérer très intéressant pour proposer un complément de TP sur la mesure de la résistivité électrique d'un nanofil isolé.

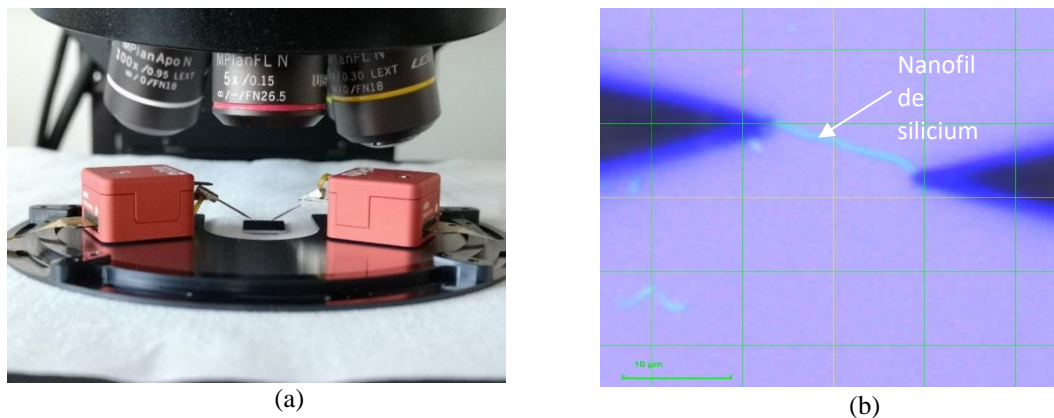


Fig.6. Plateforme d'observation de l'ensemble microscope confocal + nano-robots (a), cliché optique d'un nanofil de silicium isolé sur un substrat isolant connecté aux pointes des deux nano-robots pour la caractérisation électrique par mesures I-V (b).

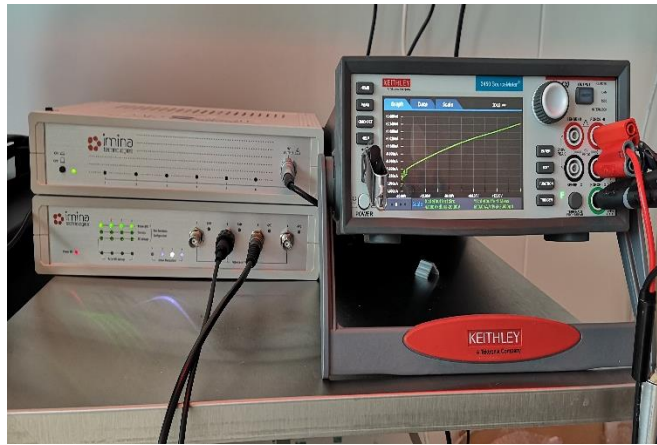


Fig.7. Analyseur Keithley 2450 couplé à l'électronique de commande des nano-robots pour les mesures I-V.

IV. Conclusion

Le microscope confocal s'avère donc être un outil de choix à la fois pour l'observation, la caractérisation physique et électrique d'objets, de composants et de systèmes à différents niveaux d'échelle. Un tel équipement constitue une plus-value pour l'ensemble des formations proposées au CCMO, couvrant un domaine d'activités large, allant de la micro- et nano-électronique intégrée, en passant par les micro- et nano-technologies et la caractérisation à l'échelle nanométrique.

Cet outil est un bel exemple de mutualisation des équipements de recherche et de formation, grâce aux partages de locaux communs entre le CCMO, Nano-rennes et CYBER-ELEC au sein de l'IETR. Cet environnement ne peut que contribuer à enrichir le catalogue des formations du CCMO.

Remerciements

Les auteurs remercient le GIP CNFM pour le financement des nano-robots IMINA via le soutien du projet FINMINA, et le CPER CYBER Sécurité des Systèmes d'Informations pour le financement du microscope confocale Lext OLS500.

Références

1. <https://irds.ieee.org/editions/2020>
2. T. Wilson, A.R. Carlini Three dimensional imaging in confocal imaging systems with finite-sized detectors. *J. Microsc.* 141, 51–66 (1988).
3. GIP-CNFM: Groupement d'Intérêt Public - Coordination Nationale pour la formation en Microélectronique et en nanotechnologies. *Website: http://www.cnfm.fr (Accès 2021)*
4. <https://nano-rennes.insa-rennes.fr/>
5. <https://www.olympus-ims.com/fr/microscopes/laser-confocal/ols5100/>
6. IDEFI-FINMINA : Initiative d'Excellence - Formation Innovante en Microélectronique et Nanotechnologies, ANR-11-IDFI-0017. *Website: http://www.cnfm.fr/VersionFrancaise/actualites/FINMINA.htm (Accès 2021)*
7. IMINA Technologies <https://imina.ch/en>
8. J. P. Landesman, L. Pichon, F. Gouttefangeas « Nano robots pour la manipulation de nanofils de silicium », *Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, vol 16, 1010, (2017) <https://doi.org/10.1051/j3ea/20171010>