

Microscopie d'électrons lents polarisés en spin pour l'imagerie de systèmes magnétiques de faible dimensionnalité

Nicolas Rougemaille ^{a,*}, Andreas Schmid ^b

^a Institut Néel, CNRS-UJF, BP166, F-38042 Grenoble cedex 9, France

^b NCEM, Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road MS/72, Berkeley, CA 94720, USA

Résumé - L'objet de cette présentation est de décrire les principes généraux de la microscopie d'électrons de basse énergie et polarisés en spin (SPLEEM). La microscopie SPLEEM est une technique d'imagerie dédiée à l'étude de surfaces magnétiques. Les potentialités et les performances de cette technique seront illustrées au travers de résultats récents obtenus au Lawrence Berkeley National Laboratory. La complémentarité du SPLEEM avec d'autres techniques d'imagerie magnétique, et en particulier avec la microscopie à photoémission d'électrons X (X-PEEM), sera discutée.

1. Imager le magnétisme à l'échelle nanométrique

Ces dix à vingt dernières années, de nombreuses techniques de microscopie ont été développées pour imager le magnétisme de surfaces, d'interfaces et de couches minces avec une résolution nanométrique. La microscopie à force magnétique, la microscopie électronique à balayage résolue en spin ou à effet tunnel polarisé en spin sont quelques-unes des techniques les plus connues. Ces techniques ont permis non seulement de réaliser des avancées significatives en matière d'imagerie magnétique, mais également d'étudier et de comprendre en détail un grand nombre des problèmes qui se posent en micro et nanomagnétisme (nucléation, formation, propagation des domaines et des parois magnétiques, apparition de l'ordre magnétique, dynamique d'aimantation...) [1]. Bien que ces problèmes aient été pour l'essentiel abordés d'un point de vue fondamental, les implications potentielles des nanostructures magnétiques dans les domaines liés au stockage de l'information motivent aujourd'hui de nouvelles études, nécessitant des mesures toujours plus complètes et plus précises (résolution spatiale nanométrique, résolution temporelle sub-nanoseconde, cartographie tridimensionnelle de l'aimantation, sélectivité chimique, corrélation structure - magnétisme...) [2].

Dans les années 1990, une autre technique dédiée à l'imagerie de surfaces magnétiques a été mise au point : la microscopie d'électrons de basse énergie et polarisés en spin (SPLEEM). Le SPLEEM est une extension de la microscopie conventionnelle d'électrons de basse énergie (LEEM) dans laquelle la source d'électrons fournit des électrons polarisés en spin (figure 1). Tout comme le LEEM, le SPLEEM est une méthode d'imagerie directe qui permet d'acquérir des images à la cadence vidéo, avec une résolution spatiale inférieure à 10 nm [3-4]. On peut ainsi corréler, en temps réel, des informations topographiques, morphologiques et spectroscopiques à des données magnétiques. De plus, la direction de la polarisation de spin du faisceau d'électrons incidents peut être ajustée dans n'importe quelle direction de l'espace, permettant de cartographier en 3 dimensions la distribution locale de l'aimantation du matériau étudié.

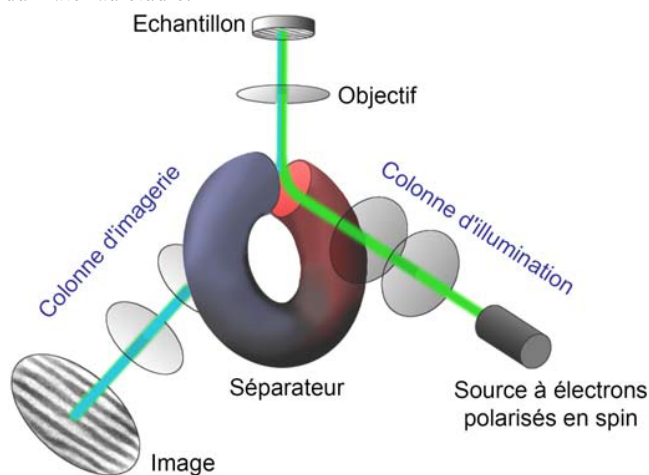


Figure 1 – Schéma de principe du SPLEEM. Des électrons de très basse énergie (quelques eV) sont injectés en incidence normale sur la surface étudiée, et l'on détecte les électrons rétrodiffusés balistiquement par cette surface pour en faire l'image. Pour une surface ferromagnétique, le nombre d'électrons rétrodiffusés dépend de l'orientation relative de son aimantation locale et du spin des électrons incidents, ce qui confère à la technique une sensibilité au magnétisme.

* Auteur à contacter : nicolas.rougemaille@grenoble.cnrs.fr – Tel : 04 76 88 74 27

2. Sonder une composante quelconque de l'aimantation

Dans un microscope SPLEEM, la source d'électrons conventionnelle (filament) est remplacée par un canon à électrons polarisés en spin. Ce canon est composé d'une source et d'une optique électronique spécifique.

Les faisceaux d'électrons polarisés en spin sont produits au moyen de photocathodes d'arséniure de gallium fortement dopées p, en condition de pompage optique. Sous illumination par une lumière polarisée circulairement, d'énergie proche de la bande interdite de GaAs, les électrons photogénérés dans la bande de conduction portent une polarisation de spin (longitudinale) de 50%. Ces électrons peuvent être extraits dans le vide en abaissant le travail de sortie de la surface du cristal de GaAs en dessous du minimum de la bande de conduction en volume. Cet état d'affinité électronique négative est en pratique obtenu par co-dépôt de césium et d'oxygène dans des conditions d'ultra-vide. On réalise ainsi des sources d'électrons polarisés en spin intenses (le rendement quantique usuel est de plusieurs pour cent), quasi monocinétiques (la largeur de la distribution à mi-hauteur est typiquement de 200 meV), dont le signe de la polarisation peut être inversé facilement en inversant la polarisation de la lumière excitatrice [5].

Si l'on veut manipuler et contrôler l'orientation de la polarisation de spin du faisceau d'électrons dans les trois directions de l'espace, afin de pouvoir sonder une composante quelconque de l'aimantation de l'échantillon (figure 2), il est indispensable d'insérer une optique électronique spécifique entre la source d'électrons et la colonne d'illumination du microscope. Le principe d'une telle optique électronique repose sur l'association de lentilles électrostatiques et d'éléments magnétiques qui permettent d'agir indépendamment sur la trajectoire et la polarisation de spin des électrons. Son fonctionnement sera décrit dans cette présentation.

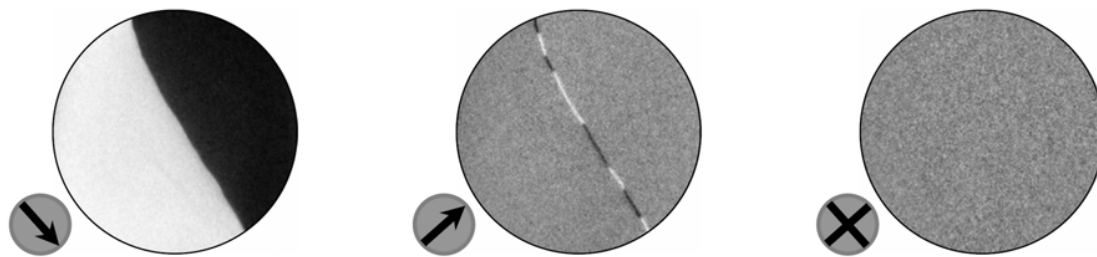


Figure 2 – Contraste magnétique SPLEEM d'un film de fer d'épaisseur nanométrique épitaxié sur une surface (110) de tungstène. Ces images, correspondant à la même région de la surface, ont été obtenues pour 3 directions différentes de la polarisation de spin des électrons injectés (indiquée par une flèche cerclée noire). L'aimantation de la couche de fer est purement planaire (aucun contraste magnétique n'est détecté sur l'image de droite où la polarisation de spin est perpendiculaire à la surface). L'image du milieu "révèle" la configuration micromagnétique de la paroi qui sépare les 2 domaines magnétiques observés sur l'image de gauche. Sur chacune de ces images, le champ de vue est de 7 microns.

3. Discussion

Les potentialités et les performances de la microscopie SPLEEM seront illustrées au travers d'études menées actuellement au Lawrence Berkeley National Laboratory. Nous discuterons également la complémentarité du SPLEEM avec d'autres techniques d'imagerie magnétique, et en particulier avec la microscopie à photoémission d'électrons X (X-PEEM) qui sera bientôt implantée au synchrotron national SOLEIL.

4. Références

- [1] A. Hubert et R. Schäfer, *Magnetic Domains: The analysis of magnetic microstructures*, Springer, Berlin, 1998
- [2] J. Stöhr et H.C. Siegmann, *Magnetism: from fundamentals to nanoscale dynamics*, Springer, Berlin, 2006
- [3] E. Bauer, T. Duden, et R. Zdyb, *Spin-polarized low energy electron microscopy of ferromagnetic thin films*, J. Phys. D.: Appl. Phys. **35** (2002) 2327-2331
- [4] T. Duden et E. Bauer, *Spin-polarized low energy electron microscopy of ferromagnetic layers*, J. Electron Microsc. **47** (1998) 379-385
- [5] D. T. Pierce, F. Meier, et P. Zürcher, *Negative electron affinity GaAs: a new source of spin-polarized electrons*, Appl. Phys. Lett. **26** (1975) 670-672