HAL
open science

Une approche bottom-up pour le nanomagnétisme : auto-organisation de fils de fer monocristallins

Bogdana L. Borca

To cite this version:

Bogdana L. Borca. Une approche bottom-up pour le nanomagnétisme : auto-organisation de fils de fer monocristallins. 2007. hal-00175581

HAL Id: hal-00175581

https://hal.science/hal-00175581v1

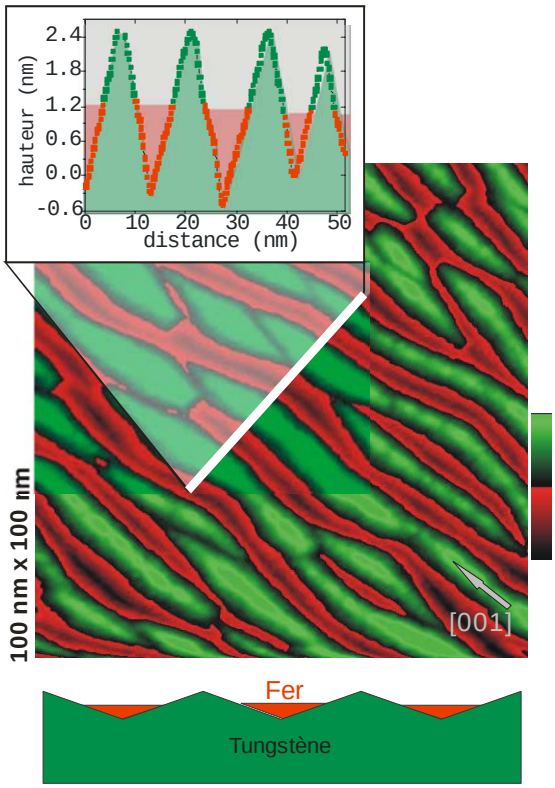
Preprint submitted on 28 Sep 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Une approche bottom-up pour le nanomagnétisme : auto-organisation de fils de fer monocristallins

Bogdana Borca
Institut Néel (CNRS-UJF-INPG), B.P. 166, 38042 Grenoble Cedex 9



Cartographie, réalisée par microscopie à effet tunnel, d'une surface de tungstène auto-organisée en toits d'usine. Les arêtes et vallées sont orientées suivant la direction cristallographique [001] du plan (110) du W (matériau cubique centré), lui-même déposé sur une tranche de saphir. La coupe selon la ligne blanche révèle la période (10-12 nm) et la hauteur (2-2.5 nm) de ces gabarits. Un dépôt de fer sur ce gabarit donne lieu à des fils magnétiques au fond des tranchées, représentés ici en rouge.

"There is no physical law against shrinking devices down to the atomic level. Using 100 atoms per bit, all the human information can be stored in a 0.15 mm^3 cube", disait en 1959 Richard Feynman. Ce physicien visionnaire indiquait déjà la route des progrès qui mettront un demi-siècle à aboutir à ce qu'il est maintenant communément appelé nanosciences et nanotechnologie. Le stockage de masse des informations, évoqué par Richard Feynman, repose aujourd'hui pour l'essentiel sur l'enregistrement magnétique. Le tournant de cette technique, initiée il y a environ 100 ans sur des cordes à piano pour des enregistrements vocaux (ancêtres des bandes magnétiques) a été la mise au point en 1956 du premier disque dur par IBM. Les informations de tout type sont digitalisées puis stockées sur un support magnétique à l'aide d'un dispositif miniaturisé qui inscrit de petits domaines magnétiques orientés en pôles nord ou sud, appelés 'bits' en anglais, et codant les '0' et les '1' de l'informatique. Concrètement chaque bit est constitué d'une assemblée de grains magnétiques nanométriques, en nombre suffisant (plusieurs centaines) pour assurer un rapport signal sur bruit adéquat.

L'augmentation de la densité de stockage, qui a connu une évolution exponentielle avec depuis deux décennies un doublement tous les dix-huit mois, a pu être maintenue en diminuant la taille de ces grains. Actuellement d'un diamètre proche de 10 nm (1/100 000 de

mm) ces grains se rapprochent inexorablement d'un comportement dit « superparamagnétique » : leur aimantation se met à fluctuer spontanément sous la seule action de l'agitation thermique, celle-ci devenant comparable à l'énergie dite d'anisotropie magnétique proportionnelle au volume du grain. Le stockage d'information n'est bien entendu plus possible dans ces conditions. Une piste évoquée pour néanmoins poursuivre les progrès serait l'écriture d'un bit sur un unique grain, aux propriétés géométriques et magnétiques qu'il faudrait alors contrôler précisément pour conserver un rapport signal sur bruit acceptable.

La recherche fondamentale permet de sonder ce que pourraient être les difficultés et les limites ultimes de telles approches, grâce à la mise en œuvre de méthodes de laboratoire pointues et l'élaboration de nanostructures modèles, comme le système présenté ici. Il s'agit d'un réseau de fils de Fer (Fe) nanométriques entièrement fabriqué par auto-organisation, une méthode dite 'bottom-up' où des nanostructures sont formées directement pendant la croissance à partir d'entités de base (atomes, clusters etc). Ceci évite le recours aux procédés de lithographie, très couteux.

Les réseaux de fils de Fe sont préparés par épitaxie (c.à.d. croissance cristalline) sous ultra-haut vide (UHV) par la technique de dépôt par laser pulsé (DLP). Ils sont réalisés sur wafers commerciaux (saphir) pour plus de versatilité. La fabrication comprend deux étapes. Dans un premier temps nous fabriquons un gabarit non magnétique. Nous réalisons pour cela la croissance selon le plan cristallographique (110) de métaux de structure cristallographique cubique centré (molybdène Mo ; tungstène W). L'utilisation de la surface (110) et d'une température de dépôt modérée (25-150ºC) permet la formation d'une rugosité anisotrope, présentant des arêtes et des vallées orientées selon l'axe planaire [001]. L'explication proposée dans la littérature de cette rugosité (en fait peu étudiée) est, d'une manière ou d'une autre, liée à une anisotropie de diffusion des atomes selon les deux directions[1]. Nous avons mis en évidence que ces surfaces rugueuses, dites en toits d'usine, présentent après seulement quelques nanomètres de dépôt des facettes d'angle bien déterminé, donc deviennent régulières[2]. Cet aspect est intéressant pour limiter les dispersions de propriétés magnétiques. De plus, par rapport à l'essentiel des études rapportées dans la littérature, l'auto-organisation est réalisée ici par un effet cinétique, ce qui nous permet de changer la période spatiale par la température de dépôt. Nous avons ainsi pu obtenir des périodes allant de 4 à 12 nm, la profondeur des sillons étant alors 0.6-0.8 nm et 2-3 nm respectivement. Dans un second temps du fer est déposé à 150°C également. Celui-ci, plus mobile que le W à température identique, comble les sillons et forme donc des fils. Ces effets ont été suivis en temps réel d'une part par diffraction d'électrons rapides, d'autre part par microscopie électronique à effet tunnel, en anglais STM (Scanning Tunneling Microscopy). Nous avons également réalisé des essais de réseaux tridimensionnels de nanofils de Fe, obtenus par des dépôts séquentiels de Fe et W à 150°C, le W reformant les sillons à chaque séquence.

La fabrication de toits d'usine de W de grande période (10-12 nm) nous a permis de préparer des fils magnétiques d'une épaisseur locale de 1 nanomètre de Fe environ (5 plans atomiques). Ces fils sont recouverts d'une protection contre l'oxydation avant mesures magnétiques ex situ. Les fils de type Mo/Fe/W ont une aimantation orientée préférentiellement le long des fils[3] ; on parle d'axe de facile aimantation. Du fait des excitations thermiques exacerbées en basse dimensionnalité (dimension 1 pour des fils) ces systèmes ne sont plus ferromagnétiques à température ambiante (on parle de superparamagnétisme). La résistance de nanostructures face à l'agitation thermique se mesure à la force de ce que l'on appelle l'anisotropie magnétique, et dont le signe détermine comme on l'a vu l'axe de facile aimantation. C'est ce principe qui est à la base des aimants permanents et de l'enregistrement magnétique. En mettant à profit la dépendance de l'énergie

d'anisotropie selon l'élément en interface avec le Fe, nous avons pu modifier l'anisotropie des fils en utilisant une couche intercalaire en Mo de un plan atomique d'épaisseur seulement (0.2nm), ou de couches de couverture (Pd, Al). Le renforcement de l'anisotropie des systèmes Mo/Fe/Mo/W nous a ainsi permis d'augmenter la température de ferromagnétisme des fils. Un objectif des recherches en cours est de parvenir à rétablir des propriétés fonctionnelles jusqu'à la température ambiante.

Références

[1] M. Albrecht et al. *Surf. Sci.* **294,** 1 (1993).
[2] O. Fruchart et al. *J. Phys. : Cond. Mat.* **19** (5), 053001 (2007)
[3] B. Borca et al. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 142507 (2007)