



ALEXANDRA MOUGIN*, DELPHINE LEBEUGLE*,**, MICHEL VIRET**,
DOROTHÉE COLSON**, LAURENT RANNO***

*Laboratoire de Physique des Solides (LPS) (UMR 8502, UPS / CNRS)

UFR Sciences

**CEA Saclay, DSM / IRAMIS / SPEC

***Institut Néel, Grenoble

Effort de mémoire



© A. MOUGIN, CNRS 2009

Fabriquer des mémoires numériques encore plus petites et qui consomment encore moins d'énergie pour l'électronique nomade ? Ce défi pourrait être relevé grâce à une nouvelle classe de matériaux, alliant des propriétés électriques et magnétiques inhabituelles.

Photo : Image des domaines ferroélectriques du composé multiferroïque BiFeO₃.

Dans la course à la miniaturisation des mémoires numériques (**encadré 1**), les composés multiferroïques suscitent un intérêt particulier. Leurs propriétés électriques et magnétiques peu communes pourraient, si l'on parvenait à les dompter, conduire à un nouveau type de disque dur avec des mémoires à quatre états et non plus seulement deux (le codage binaire actuel des bits*). Notre consortium de chercheurs du Laboratoire de physique des solides (Université Paris-Sud 11/CNRS), du CEA de Saclay et de l'Institut Néel (CNRS), à Grenoble, a franchi une étape dans l'étude de ces composés en contrôlant localement leurs propriétés électriques et magnétiques.

Ce couplage magnétoélectrique est la propriété qui intéresse les chercheurs: il «suffit» d'appliquer un champ électrique pour changer la polarisation électrique et, par conséquent, l'organisation des moments magnétiques. Aujourd'hui, dans un disque dur, chaque bit est codé en appliquant un champ magnétique à un composé ferromagnétique. Le champ oriente localement l'aimantation du composé, laquelle peut prendre deux directions privilégiées, qui correspondent aux deux valeurs 0 ou 1 du bit (**encadré 3**). Remplacer ces composés magnétiques par des composés multiferroïques permettrait de commander l'aimantation à l'aide d'un champ électrique, moins coûteux en énergie qu'un champ magnétique – un aspect non négligeable pour l'électronique nomade,

Le défi du couplage

Les composés multiferroïques sont des matériaux qui possèdent simultanément plusieurs propriétés dites ferroïques qui peuvent être le ferromagnétisme, la ferroélectricité ou encore la ferroélasticité. Leur point commun: être capables de demeurer dans un état (magnétique, électrique ou élastique), même quand la cause extérieure qui a produit le changement d'état a cessé son action. Ainsi les matériaux ferromagnétiques s'aimantent très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et certains gardent une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur (**encadré 2**). Les matériaux ferroélectriques quant à eux, possèdent un moment dipolaire électrique à l'état spontané, polarisation qui peut être renversée par l'application d'un champ électrique extérieur. Les composés auxquels nous nous sommes intéressés sont des matériaux qui possèdent à la fois un ordre électrique et un ordre magnétique (**Figure 1**). Pourtant, ils sont pour la plupart antiferromagnétiques: ces composés contiennent certes des atomes magnétiques, toutefois les moments magnétiques de ces atomes se «compensent», de sorte que l'aimantation est nulle. L'atout intrinsèque de ces multiferroïques repose sur l'existence d'un couplage dit magnéto-électrique entre ces deux ordres électrique et magnétique: la polarisation électrique influence l'ordre magnétique et réciproquement.

1 Électronique de spin ou comment le magnétisme rentre dans notre quotidien

Bandes magnétiques, disquettes, tickets de métro, cartes bancaires, disques durs: depuis plusieurs décennies, l'enregistrement magnétique du son, des images ou des données a envahi la vie courante. Il s'agit de stocker l'information sur un matériau magnétique sous forme de régions d'aimantations distinctes: c'est comme écrire un message codé (par des 0 et des 1) avec de petits aimants et le déchiffrer avec une boussole.

L'électronique usuelle repose sur une propriété essentielle de l'électron: sa charge électrique et le courant qu'elle produit en se déplaçant. En pratique, les processeurs des ordinateurs sont composés de millions de transistors (imprimés sur un circuit électronique) qui chacun ne gère que des bits 0 («le courant ne passe pas») et 1 («le courant passe»). La spintronique – ou électronique de spin – permet d'exploiter une propriété supplémentaire de l'électron, son moment magnétique (ou "spin") ce qui en fait une technologie émergente aux nombreuses applications dans le domaine du stockage des données.

FIGURE 1

Schéma de principe de la coexistence des propriétés de ferroélectricité et ferromagnétisme dans les composés multiferroïques. Image modifiée à partir de Daniel Khomskij, Physics 2, 20 (2009).

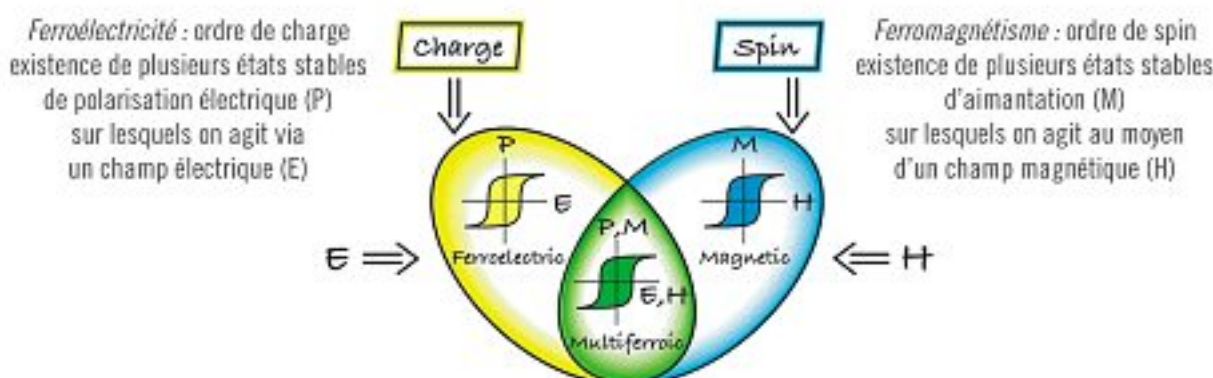
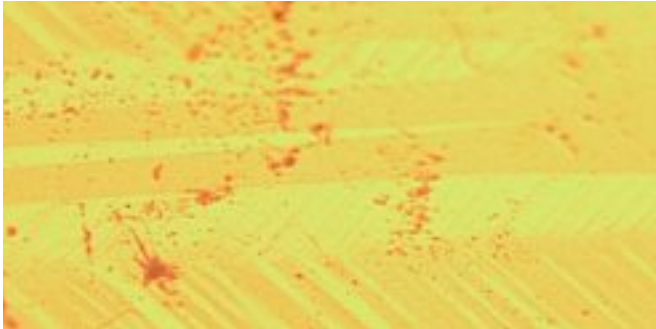


FIGURE 2

Les domaines ferroélectriques du composé multiferroïque BiFeO_3 sont observés ici en lumière polarisée* en présence d'un champ électrique de 25 kilovolts par centimètre appliqué au travers de l'épaisseur du cristal. La technique d'imagerie utilisée est la microscopie avec analyse de polarisation. Elle fait apparaître les domaines ferroélectriques avec un contraste différent selon leur polarisation électrique (via la propriété de biréfringence*).



2 Le moment magnétique des électrons

Tout matériau est constitué de minuscules atomes d'une taille d'environ 0,3 nanomètres: 100 000 fois plus minces qu'un cheveu! Ces atomes sont formés d'électrons en orbite autour d'un noyau, lui-même composé de protons et de neutrons. En plus d'une charge électrique (négative), les électrons possèdent un moment magnétique (appelé "spin") qui peut être orienté vers le haut (état "up") ou vers le bas (état "down"): ce moment magnétique des électrons, minuscule aimant à l'échelle microscopique, peut être considéré comme l'entité magnétique élémentaire de la matière. Le moment magnétique d'un atome est, pour l'essentiel, la somme des moments magnétiques des électrons qui le composent.

A l'échelle macroscopique, l'aimantation d'un matériau magnétique résulte de la somme des moments magnétiques portés par chacun des atomes. Quand tous les minuscules aimants atomiques d'un matériau s'alignent dans la même direction, on parle d'ordre ferromagnétique et le matériau possède une aimantation spontanée. Dans la majorité des matériaux ferromagnétiques, les moments magnétiques des atomes qui les constituent ne sont alignés que très localement, par domaines, et non globalement dans tout le matériau. Lorsqu'on approche un aimant d'un tel matériau, les moments magnétiques du matériau s'alignent avec ceux de l'aimant: on agit sur l'aimantation au moyen d'un champ magnétique et on dit que le matériau se polarise magnétiquement. Dans les matériaux dits antiferromagnétiques, l'organisation des moments atomiques est telle que ces derniers se compensent. L'aimantation est alors nulle. Pour leur imposer une aimantation macroscopique, il est nécessaire d'appliquer des champs magnétiques colossaux, rarement obtenus en laboratoire et inenvisageables au niveau des applications grand public.

par exemple. En outre, un codage sur quatre états pourrait être envisagé (deux états liés à l'orientation de l'aimantation du composé, mais aussi deux états liés à celle de sa polarisation électrique), permettant de stocker plus d'information.

Exploiter les propriétés...

Ce scénario comporte cependant une difficulté de taille: l'aimantation des composés multiferroïques, à cause du couplage magnéto-électrique, est... très souvent nulle. C'est là que notre groupe intervient... Pour suppléer à l'absence d'aimantation macroscopique tout en tirant profit du couplage magnéto-électrique, nous avons choisi d'exploiter le couplage d'échange* qui se développe à l'interface entre une couche d'un matériau ferromagnétique usuel et l'ordre antiferromagnétique du composé multiferroïque. Notre objectif était donc de développer des mémoires magnétiques à deux états, modifiables par l'application d'un champ électrique, moins consommateur en énergie et plus local qu'un champ magnétique. En d'autres termes, en déposant sur un cristal multiferroïque une fine couche d'un composé ferromagnétique, nous avons substitué l'aimantation d'une couche supplémentaire à l'aimantation qui faisait défaut dans le composé multiferroïque. Dans cette approche, nous nous sommes focalisés sur le composé BiFeO_3 , l'orthoferrite de bismuth (BFO). Il est multiferroïque à température ambiante. Comme matériau magnétique associé, nous avons utilisé un alliage ferromagnétique (NiFe), le permalloy (Py).

...pour les modifier

En appliquant un champ électrique au cristal de BFO, il est relativement aisé d'en modifier la structure en domaines ferroélectriques (Figure 2). En plaçant le matériau composite – le cristal et sa couche ferromagnétique – dans un champ électrique, nous avons fait tourner l'orientation privilégiée de l'aimantation de la couche ferromagnétique: le champ électrique modifie la structure en domaines ferroélectriques du cristal, et donc son ordre antiferromagnétique via le couplage magnéto-électrique. Il apparaît ensuite que la structure antiferromagnétique de « volume » du BFO influe sur le comportement de la couche ferromagnétique avec laquelle elle interagit. Tout se passe comme si le couplage magnéto-électrique « se propageait » dans la couche ferromagnétique et influençait ses propriétés magnétiques.

De manière plus quantitative, nous avons montré qu'un changement de la structure en domaines ferroélectriques du cristal de BFO par application d'un champ électrique permet un contrôle de l'anisotropie du film ferromagnétique déposé dessus. La figure 3 illustre ces résultats: une rotation de 90° de la polarisation électrique d'un domaine à l'autre du cristal de BFO peut induire une rotation cor-

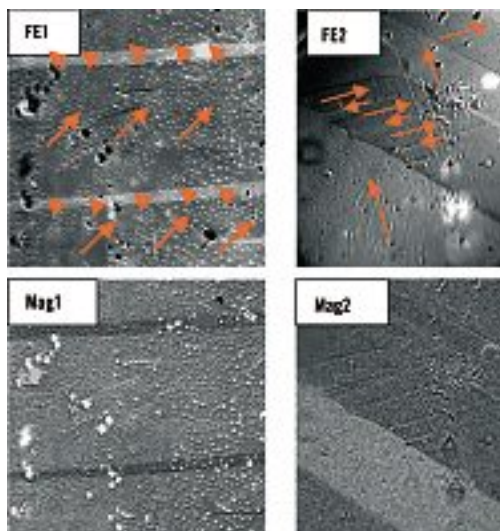
respondante des axes d'anisotropie* (c'est-à-dire les directions d'orientation de l'aimantation) de la couche ferromagnétique. On observe alors une coïncidence stricte des domaines ferroélectriques et ferromagnétiques (colonne de gauche). Il existe également des zones multidomaines ferroélectriques pour lesquelles l'anisotropie de la couche ferromagnétique reste identique (colonne de droite). Cela est dû à la structure antiferromagnétique complexe du cristal de BFO. Celle-ci est en fait caractérisée par le développement d'une structure modulée appelée cycloïde, qui peut se propager selon trois directions pour une orientation donnée de la polarisation électrique. L'anisotropie de la couche ferromagnétique est imposée par le vecteur de propagation de la cycloïde et non pas par la direction de la polarisation électrique.

Pour repousser les limites de la miniaturisation

Pour l'heure, le contrôle de l'aimantation du ferromagnétique à l'aide du champ électrique n'est pas total, car on ne sait pas imposer l'orientation de l'aimantation *via* le champ électrique mais seulement l'orientation privilégiée de l'aimantation. Nous tentons de pallier ce problème en travaillant aussi avec des couches minces du même composé multiferroïque (collaboration avec l'UMR CNRS Thalès). De structure antiferromagnétique plus simple, ces couches pourraient constituer une première étape vers la miniaturisation. ■

FIGURE 3

Images magnéto-optique et en biréfringence du contraste magnétique (Mag) et ferroélectrique (FE) sur une structure BFO (cristal) / Py montrant une coïncidence des domaines ferroélectriques et ferromagnétiques (colonne de gauche) et une structure en domaines ferroélectriques sans incidence sur la structure en domaines magnétiques (colonne de droite). Les flèches indiquent l'orientation de la polarisation électrique.



Glossaire

Anisotropie :

Une propriété physique anisotrope présente des caractéristiques différentes selon la direction considérée, au contraire d'une propriété isotrope, qui ne dépend pas de la direction.

Biréfringence :

Dans un matériau biréfringent, la lumière se propage de façon anisotrope. Cela vient de ce que l'indice de réfraction dépend des directions de propagation et de polarisation du rayon lumineux.

Bit :

En anglais « Binary digIT », c'est-à-dire « chiffre binaire ». En base 2, tout nombre s'écrit avec les seuls chiffres 0 et 1. Ces chiffres peuvent être représentés, en électronique, au moyen de transistors à deux états, ou en magnétisme, par des aimants dont les moments magnétiques pointent dans deux directions opposées.

Couplage d'échange :

Les électrons dans la matière sont soumis aux lois de la mécanique quantique. En particulier, il est impossible pour deux électrons de se trouver au même endroit dans le même état, en vertu du principe d'exclusion de Pauli. Cette loi implique que « l'échange » de deux électrons coûte de l'énergie, et agit comme un « couplage ». Ce dernier peut conduire à une propriété magnétique.

Lumière polarisée :

Les rayons lumineux peuvent être considérés comme des champs électrique et magnétique se propageant en oscillant dans l'espace, à la vitesse de la lumière, tous deux perpendiculaires à la direction de propagation. La direction d'oscillation des champs définit la direction de polarisation. Celle-ci peut être rectiligne, circulaire ou elliptique.

3 Codage binaire

Il y a près de deux siècles, Samuel Morse nous montrait, avec un certain succès, la manière de coder tout un alphabet uniquement à l'aide de deux symboles : un point et un trait. Logiquement, la chose ne devait pas présenter trop de problème avec des « 1 » et des « 0 ». De fait, le principe général du codage binaire de l'information est désarmant d'évidence : à chaque caractère que l'on veut coder, on associe un nombre donné, toujours identique. Aujourd'hui, le bit est un concept essentiel de l'informatique et du stockage numérique. Pour mener à bien cette numérisation, trois éléments s'avèrent nécessaires :

- Un jeu de caractères, décrivant tous les caractères que l'on désire pouvoir utiliser.
- Une table de référence attribuant à chaque caractère du répertoire un code numérique unique.
- Une technique d'encodage permettant de transformer le code numérique de chaque caractère sous forme binaire, c'est-à-dire d'octet (s).