

09 LE POINT SUR

En 2018, le coréen Samsung entamera la production industrielle de mémoires magnétiques STT-MRAM ; le taïwanais TSMC devrait lancer des puces dotées de mémoires magnétiques embarquées (eMRAM)... Ces derniers mois, les annonces de ce genre se sont multipliées. Preuve que les grands noms de la microélectronique croient en l'avenir de la spintronique, jeune discipline mariant la microélectronique et le magnétisme...

par Fabrice Demarthon

Circuit hybride semiconducteur/magnétique réalisé à Spintec.

La spintronique

« Historiquement, le magnétisme a toujours été ignoré des microélectroniciens, rappelle Bernard Diény, chercheur au CEA-Inac¹ et directeur scientifique du laboratoire Spintec à Grenoble (voir encadré). Les matériaux magnétiques étaient considérés comme des impuretés à bannir des salles blanches ! » Mais depuis quelques années, le vent tourne et les nombreux atouts des mémoires magnétiques obligent les microélectroniciens à revoir leur copie et à s'intéresser de près aux phénomènes magnétiques. « C'est un changement radical de culture pour les fondeurs ! », observe Bernard Diény.

Tirer parti du degré de liberté du spin de l'électron

Concrètement, que se cache-t-il derrière ce nom un peu barbare de spintronique ? Le concept est relativement simple à comprendre. Les électrons sont des particules élémentaires chargées négativement. Ils font partie des briques de base des atomes et forment le courant électrique quand ils se déplacent. Ce sont ces charges négatives que les dispositifs de la microélectronique conventionnelle, comme le transistor, manipulent. Les électrons possèdent également

une autre propriété intéressante, appelée **spin**. « Le spin est une grandeur quantique qui n'a pas d'équivalent classique mais qui est assimilable à un moment magnétique intrinsèque à la particule », décrit Bernard Diény. Un peu comme si l'électron était en fait un minuscule aimant en rotation sur lui-même. Et comme un aimant possède un pôle nord et un pôle sud, le spin possède aussi une « orientation », vers le haut (*up*) ou vers le bas (*down*). Tout l'art de la spintronique est donc de tirer parti de ce degré de liberté pour générer des phénomènes nouveaux et chercher à les utiliser pour améliorer les performances de circuits électroniques ou introduire de nouvelles fonctionnalités.

Magnétorésistance géante dans les disques durs des ordinateurs...

Cette discipline émerge en 1988, avec la découverte de la magnétorésistance géante (GMR) par le Français Albert Fert et l'Allemand Peter Grünberg, nobélisés en 2007. Le principe : faire varier la **résistance électrique** d'un matériau constitué de couches successives magnétiques (fer, cobalt, nickel...) et non magnétiques (chrome, cuivre, argent...) en le soumettant à un champ magnétique externe. ♦♦♦

Spin

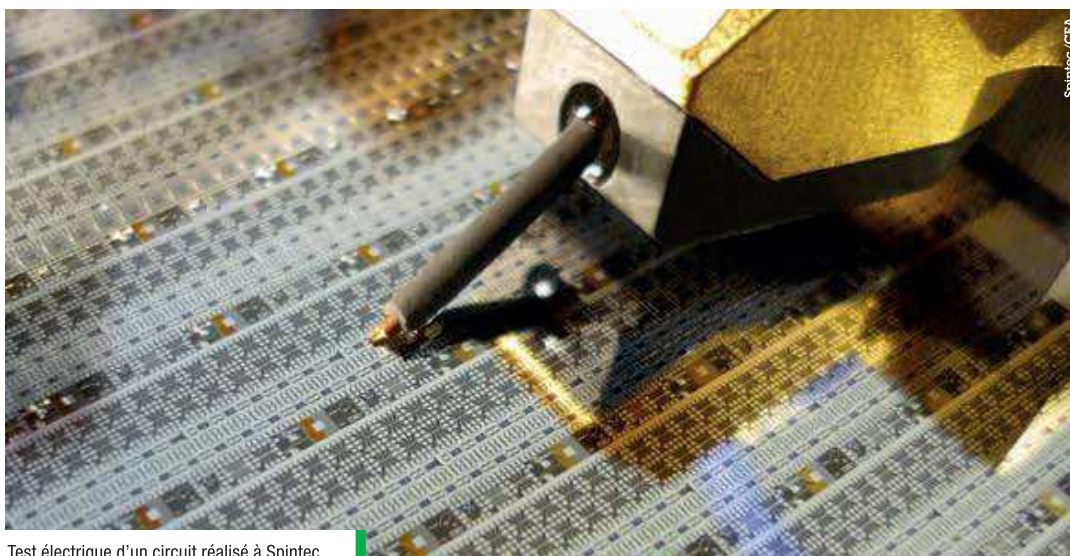
Propriété quantique d'une particule, associée à un moment magnétique.

Résistance électrique

Aptitude d'un matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique.

Note :

1. Institut de nanosciences de la Direction de la recherche fondamentale du CEA.



Test électrique d'un circuit réalisé à Spintec.

Spintec/CEA

La recherche fondamentale européenne est à la pointe. Reste à nos grandes entreprises à s'engager activement

Bernard Diény, chercheur au CEA-Inac



« À l'époque, il n'était possible de modifier la résistance d'un matériau que de quelques pourcents, explique Bernard Diény. Avec la GMR, la résistance pouvait être variée d'un facteur deux ! » L'explication est à trouver dans le spin des électrons et son orientation relative à l'aimantation locale du matériau : lorsque spin et aimantation ont le même sens, l'électron est faiblement diffusé dans le matériau ; lorsqu'ils sont « tête-bêche », l'électron est fortement diffusé.

Précisément, les matériaux multicouches à GMR¹ sont constitués de couches métalliques magnétiques dont on peut varier l'orientation relative des aimantations de « parallèle » à « antiparallèle » ; ces couches magnétiques sont séparées par une couche métallique non-magnétique. Lorsque les aimantations des couches magnétiques sont en configuration antiparallèle, le matériau multicouche possède alors une forte résistance électrique, puisque les électrons qui le traversent sont fortement diffusés dans l'une ou l'autre des couches magnétiques, quel que soit leur spin. En revanche, lorsque le matériau est soumis à un champ magnétique externe, les aimantations de toutes ses couches s'alignent dans le sens du champ. Les électrons, dont le spin est orienté de la même manière, peuvent alors facilement circuler dans tout le matériau : la résistance électrique chute alors drastiquement.

Cette découverte majeure trouve rapidement des applications, notamment avec la fabrication de capteurs de champ magnétique très sensibles qui ont été abondamment utilisés, entre 1998 et 2004, dans les disques durs magnétiques des ordinateurs pour relire les bits d'informations (0 ou 1) écrits dans le média magnétique.

Magnétorésistance tunnel pour les mémoires MRAM

À partir de là, les innovations théoriques et pratiques s'enchaînent. En 1995, des chercheurs découvrent la magnétorésistance tunnel (TMR) à température ambiante. Il s'agit là encore de modifier la résistance électrique d'un matériau multicouche. Mais, cette fois, les couches magnétiques (les électrodes) sont séparées par une couche isolante très fine, faite d'oxyde, qui constitue une « barrière tunnel » pour le passage des électrons. Lorsqu'un courant électrique traverse ce sandwich, les électrons peuvent « sauter » d'une électrode à l'autre à travers la barrière isolante par un phénomène quantique appelé **effet tunnel**. Cette capacité dépend toutefois de l'orientation relative de l'aimantation des électrodes : parallèle, le courant passe plus facilement qu'anti-parallèle.

La TMR permet alors la mise au point des mémoires magnétiques MRAM (*Magnetic Random Access Memory*) : les bits d'information sont stockés dans des cellules via l'orientation relative des aimantations des deux couches magnétiques de part et d'autre de la barrière tunnel ; et cela, selon le principe suivant : une orientation parallèle engendre une faible résistance, une orientation anti-parallèle conduit à une forte résistance. L'une de ces couches dont l'aimantation est fixe est appelée « électrode de référence » ; l'autre couche dont l'aimantation est commutable, par pulse de champ magnétique ou pulse de courant, est appelée « électrode de stockage ». La lecture, elle, se fait par la mesure de la résistance électrique de la cellule en question.

Le couple de transfert de spin au cœur des STT-MRAM

Évolution plus récente des MRAM, les STT-MRAM font appel à un troisième phénomène fondamental de l'électronique de spin, mis en évidence dans les années 2000, le couple de transfert de spin (*Spin Transfer Torque*). Selon lui, un courant électrique « polarisé en spin », c'est-à-dire

Effet tunnel

Phénomène quantique par lequel un objet peut franchir une barrière de potentiel même si son énergie est inférieure à celle minimale requise pour franchir cette barrière.

Note :

1. En particulier ceux appelés « vannes de spin ».

dont la majorité des électrons ont le spin orienté dans le même sens, peut directement modifier l'aimantation de nanostructures magnétiques. Dès lors, plus besoin de champ magnétique externe, très consommateur d'énergie et à la résolution spatiale limitée, pour écrire au sein de la cellule MRAM !

« Les MRAM et STT-MRAM ont de nombreux atouts par rapport aux autres mémoires utilisées aujourd'hui, rappelle Bernard Dieny. Elles sont rapides (quelques nanosecondes en écriture) et endurantes (on peut les écrire un nombre quasi illimité de fois) contrairement à la mémoire Flash, et elles sont non-volatiles contrairement au DRAM et SRAM. » En d'autres termes, on peut couper le courant, l'information y restera stockée. Un atout considérable lorsqu'il s'agit de minimiser la consommation électrique et l'échauffement des puces dans les appareils nomades, dont l'autonomie est un enjeu important, ou dans les calculateurs haute performance et fermes de calcul qui, encore aujourd'hui, consomment autant d'énergie pour leur refroidissement que pour leur fonctionnement.

À Spintec, les prochaines générations de MRAM sont déjà en cours de préparation. La SOT-MRAM (*Spin Orbit Torque MRAM*), par exemple, permettra d'augmenter encore la rapidité d'écriture en évitant les risques de « claquage électrique » qui pèsent sur les STT-MRAM lorsque l'on cherche à les écrire avec des pulses de courant de l'ordre de la nanoseconde².

La mémoire magnétique ne devrait pourtant pas remplacer toutes les mémoires électriques : pour le stockage par

Note :
2. Augmenter la rapidité d'écriture signifie augmenter la tension électrique appliquée à la cellule MRAM. Elle peut augmenter de l'ordre de 0,4 V pour une écriture en 20 ns, à 1 V pour une écriture en 1 ns : cela rapproche de la tension de claquage diélectrique de la barrière tunnel épaisse d'à peine plus de 1 nm.

SPINTEC, LE TEMPLE DE LA SPINTRONIQUE

Créé en 2002 par le CEA, le CNRS et l'université Grenoble Alpes, le laboratoire Spintec réunit une centaine de chercheurs et d'ingénieurs (dont une soixantaine de post-docs et thésards) entièrement dédiés à l'électronique de spin. Les projets qui y sont menés couvrent toute la chaîne des recherches fondamentales jusqu'à l'élaboration de démonstrateurs.

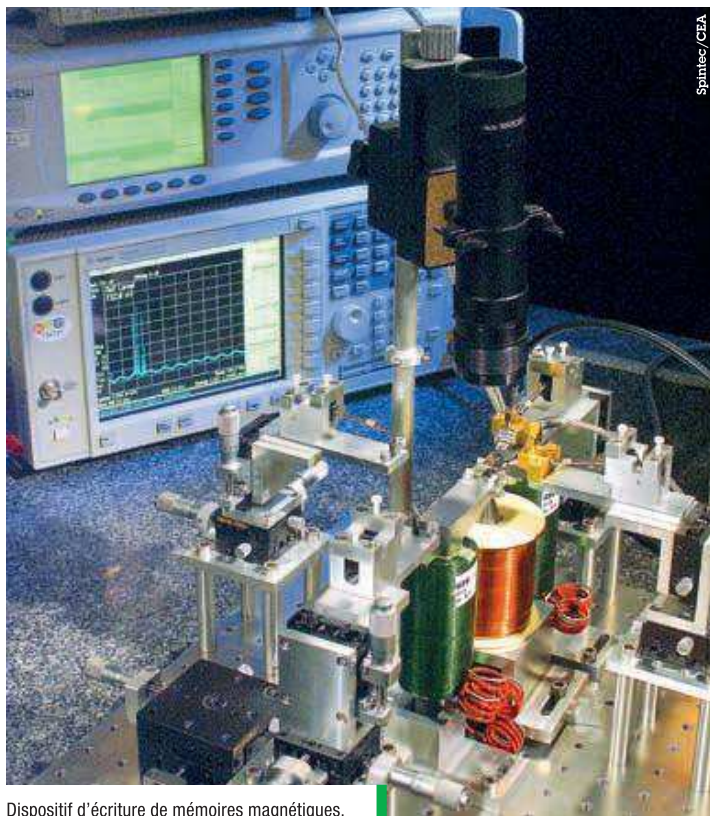
Spintec a déposé une cinquantaine de brevets, dont certains fondamentaux, et conduit à la création de quatre start-up : Crocus Technology (MRAM et capteurs magnétiques), eVaderis (conception de circuits hybrides), Antaios (SOT-MRAM), et HProbe (solutions tests des mémoires magnétiques).

exemple, la mémoire Flash qui équipe maintenant de nombreux appareils, bien que moins endurante (elle supporte un maximum de 100 000 écritures) et moins rapide (de l'ordre de la microseconde à la milliseconde en écriture), reste bien moins coûteuse à produire. « La MRAM est un peu la F1 des mémoires, sourit Bernard Dieny. Elle ne peut pas être utilisée partout. »

De la spintronique à la spin caloritronique

Après les têtes de lecture des disques durs d'ordinateurs, la spintronique a trouvé cette application dans les mémoires mais elle ne s'y cantonne pas. Elle permet ainsi l'élaboration de capteurs de champ magnétique extrêmement précis afin, par exemple, de connaître l'orientation d'objets dans l'espace. « À l'heure de l'Internet des objets, la demande pour ce type de dispositifs est en perpétuelle augmentation », observe Bernard Dieny. Ces capteurs peuvent aussi servir à enregistrer l'activité du cerveau, qui émet un champ magnétique très faible à la surface du crâne. Le domaine des télécommunications s'intéresse aussi de près à la manipulation des spins électroniques. Grâce au phénomène de transfert de spin, utilisé dans les STT-MRAM, il est possible de produire des nano-oscillateurs dits « accordables en fréquence ». À l'avenir, ils pourraient entrer dans la fabrication de téléphones portables ou de bornes wifi capables de scanner les fréquences autour d'eux et de « s'accorder » automatiquement sur les moins engorgées afin d'améliorer les communications.

La spin caloritronique, elle, entend marier spin, charge électrique et courant de chaleur avec, en vue, la production d'énergie. Quant aux memristors à base de jonctions tunnel magnétiques, ils permettent des avancées importantes dans la conception de synapses électroniques pour l'intelligence artificielle. L'avenir de la spintronique semble donc très prometteur. « La recherche fondamentale européenne est à la pointe, acquiesce Bernard Dieny. Reste à nos grandes entreprises d'électronique à s'engager activement dans ce domaine... » ♦



Dispositif d'écriture de mémoires magnétiques.