



© Atechnique-D. Midony/CEA

Plaque de silicium portant des puces de mémoire magnétique à accès aléatoire MRAM (Magnetic Random Access Memory).

L'électronique de *spin*

Un renouveau de la science et de la technologie du magnétisme

Olivier Fruchart (olivier.fruchart@cnrs.grenoble.fr)

Institut Néel (CNRS & UJF), 25 rue des Martyrs, BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9

Le magnétisme est parfois considéré comme une science un peu poussiéreuse, fondée sur l'électromagnétisme au XIX^e siècle pour les aspects macroscopiques, et définitivement cernée au milieu du XX^e siècle par la mécanique quantique et la physique de la matière condensée, pour la partie microscopique. Pour qui croyait en ces clichés, le renouveau du magnétisme durant les dernières décennies a pu surprendre. Parmi les avancées majeures figurent les aimants permanents de haute performance, et l'électronique de *spin*. Les aimants permanents de haute performance dérivent de la découverte de composés d'éléments 3d (apportant le magnétisme à température ambiante) et de terres rares (source de la forte anisotropie magnétique) : $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, SmCo_5 , etc. Ils ont permis une (r)évolution industrielle majeure pour la miniaturisation et le gain de puissance des dispositifs électromécaniques (moteurs et actionneurs). La seconde avancée, l'électronique de *spin* (ou « spintronique »), couple les aspects de transport électronique concernant la charge

de l'électron et les champs électriques, et le magnétisme concernant le *spin* de l'électron et les champs magnétiques. Son émergence a suscité un engouement majeur car, outre la nouvelle physique fondamentale à défricher, elle laissait entrevoir des applications combinant directement le stockage de l'information (le caractère rémanent des mémoires magnétiques) et son traitement (l'électronique, basée sur les charges électriques).

La date de naissance symbolique de l'électronique de *spin* est souvent fixée en 1988, année de publication de la découverte de la magnétorésistance géante par les équipes d'Albert Fert en France et de Peter Grünberg en Allemagne, et pour laquelle le prix Nobel de Physique 2007 leur a été coattribué. À cette occasion, la Société Française de Physique a souhaité consacrer un dossier à l'électronique de *spin*, et a demandé aux « magnéticiens » du bureau de la matière condensée de le coordonner : Bernard Doudin (IPCMS – Strasbourg), Henri Mariette (Institut Néel – Grenoble) et moi-même. Pour des raisons

pratiques, les articles de ce dossier sont répartis dans quatre numéros successifs de *Reflets de la physique*, à commencer par l'article d'Albert Fert dans le précédent numéro (*Reflets* n°15, pp. 5-10).

La magnétorésistance géante (acronyme anglais : GMR) est la variation significative (jusqu'à plusieurs dizaines de pourcents) de la résistance électrique entre deux électrodes ferromagnétiques, en fonction de leurs directions d'aimantation respectives. Dans son article, Albert Fert replace cette découverte dans son contexte historique, et décrit la physique sous-jacente. On notera que cette découverte fracassante faisait en réalité suite à des concepts anciens et à des recherches longues et fondamentales, par exemple l'étude de la résistivité électrique dans des alliages massifs binaires et ternaires.

La GMR n'a été qu'un point de départ. La mise en évidence de nouveaux effets en nanomagnétisme et électronique de *spin* s'est depuis accélérée à un rythme impressionnant : couplage RKKY, magnétorésistance tunnel, renversement précessionnel de l'aimantation, couple et transfert de *spin*, renversement optique de l'aimantation. Cette série de découvertes a été favorisée par la conjonction de progrès extraordinaires dans les techniques de dépôt de couches minces, de nanofabrication (lithographie), de microscopies notamment magnétiques, de sondes physiques résolues en temps jusque sub-ps, du rayonnement synchrotron, de la montée en puissance des outils de simulation *ab initio*. Complétant l'article d'Albert Fert, Bernard Dieny expose dans le présent numéro l'essentiel de ces effets. Il décrit également plus en détail une brique de base des dispositifs d'électronique de *spin* : la vanne de *spin*.

Durant cette période, la France a tenu une place très honorable parmi les grandes nations qui ont été sur l'avant-scène des progrès de l'électronique de *spin*, dont les États-Unis d'Amérique, le Japon, l'Allemagne, etc. La qualité des recherches en France a bénéficié du travail en réseau de la communauté française par le biais de GdR du CNRS (« Nanostructures Magnétiques » puis « POMMES »), et du colloque Louis Néel qui se tient tous les dix-huit mois (et rassemble maintenant près de 250 personnes !) et où les jeunes scientifiques sont mis en avant et

préparent ainsi la relève. Ceci a été complété au niveau européen par de nombreux projets et réseaux, et l'émergence d'une grande conférence récurrente sur le magnétisme (JEMS : Joint European Magnetic Symposia), dont la première édition a eu lieu en 2001 à Grenoble ; l'électronique de *spin* y est largement représentée.

L'âge d'or de l'électronique de *spin* est-il atteint, voire dépassé ? Que reste-t-il à découvrir ? Constatons en tout cas que la communauté académique de l'électronique de *spin* n'a jamais été si importante, et que les idées fourmillent. Une tendance forte est la recherche d'effets fondamentaux nouveaux par des couplages multiphysiques : magnétisme et champ électrique (changement de niveau de Fermi dans les semi-conducteurs magnétiques, couplage de déformations ou couplage d'ordres dans les multiferroïques), magnétisme et optique (renversement d'aimantation opéré par le transfert de moment orbital du photon vers les *spins*), magnétisme et chaleur (renversement d'aimantation assisté thermiquement, effet Seebeck magnétique), architectures métal-organique, etc. Ces perspectives sont développées dans l'article d'Agnès Barthélémy *et al.* (à paraître dans *Reflets* n°17).

Au-delà de cette communauté essentiellement académique, le transfert de l'électronique de *spin* vers les applications a été très rapide, s'appuyant sur deux propriétés particulièrement intéressantes du magnétisme : l'action à distance par le biais du champ magnétique (pour les capteurs et les actionneurs), et l'hystérésis (phénomène de bistabilité, base du stockage de l'information). Dans un préambule, Bernard Dieny dresse un panorama général des applications existantes et prospectives. Le transfert est pleinement effectif en ce qui concerne les capteurs de champ ultrasensibles, décrits plus en détail dans l'article de Claude Fermon *et al.* Dans le domaine des mémoires, les capteurs à base de vanes de *spin* ont permis des gains considérables de densité d'enregistrement des disques durs. En parallèle, est apparue au milieu des années 1990 la perspective de réaliser des mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM : Magnetic Random Access Memory) de hautes performances, alliant rapidité, non volatilité (donc faible

consommation), cyclabilité infinie ; bref, une mémoire idéale et universelle. Du fait de difficultés technologiques, et des progrès concomitants constants des mémoires existantes DRAM puis Flash, les MRAMs sont encore confinées à des applications niches. Jean-Pierre Nozières retrace cette épopée et l'état actuel des MRAMs dans son article.

En conclusion, l'électronique de *spin* a contribué à un renouvellement majeur et continu du magnétisme durant les vingt dernières années. Elle illustre parfaitement de nombreuses caractéristiques de la recherche en général : largement non déterministe et souvent issue de découvertes très fondamentales ; stimulée par les perspectives d'applications, même si les dispositifs finaux n'ont pas toujours été ceux qui avaient été escomptés ; rendue possible par des progrès dans l'instrumentation. Ces observations doivent nous faire réfléchir sur la manière la plus efficace de favoriser les progrès scientifiques et technologiques à long terme. Les recherches fondamentales initiales sur la conduction dans les métaux à plusieurs impuretés pourraient-elles encore être facilement financées aujourd'hui en France, où les appels à projet à court terme et sur des thématiques « prioritaires » drainent l'essentiel du financement ? Puissent les décideurs avisés admettre que la science, en principe un modèle de rigueur, doit paradoxalement s'accommoder de cette indétermination majeure, et qu'en conséquence un soutien large à la recherche fondamentale est un bon garant des découvertes et applications futures.

Ce dossier montre également que l'électronique de *spin* touche des disciplines variées, avec des problématiques d'élaboration, de caractérisation avancée, et combinant de multiples effets physiques. Elle présente donc un aspect exigeant de l'interdisciplinarité, qui est de savoir combiner une culture générale et une grande ouverture d'esprit, avec une expertise plus que jamais pointue dans chacun des domaines concernés. Tout ceci doit en faire un terrain intellectuellement stimulant pour les jeunes scientifiques, en particulier physiciens. ■