

CASSIOPEE

# L'électronique de spin

s'enrichit des électrons exotiques d'un isolant topologique

Une étude menée conjointement par des chercheurs de l'unité mixte de physique CNRS-Thales et du CEA INAC en collaboration avec l'équipe de la ligne CASSIOPEE a conduit à l'observation d'une forte conversion spin-charge à température ambiante obtenue grâce à la structure électronique particulière de l'isolant topologique  $\alpha$ -Sn. Des mesures de photoémission angulaire (ARPES) et de pompage de spin par résonance ferromagnétique ont permis de mettre en évidence ce phénomène prometteur pour la spintronique.

Le fonctionnement de la plupart des dispositifs de spintronique actuels est basé sur la manipulation de courants de spin qui ne transportent pas de charges électriques. Ces courants peuvent être décrits comme des flux égaux d'électrons portant des spins opposés et se propageant dans des directions opposées.

Les processus essentiels mis en jeu en spintronique sont la création de tels courants de spin à partir de courants de charges ou leur détection en les transformant en courants de charges. Dans les deux cas, il s'agit donc de phénomènes de conversion entre courants de charges et courants de spin. Habituellement, ces conversions sont réalisées grâce à des matériaux magnétiques mais il apparaît maintenant que le phénomène d'interaction spin-orbite peut également être utilisé.

Des exemples typiques d'effet du couplage spin-orbite sont l'effet Hall de spin dans les métaux lourds par lequel un courant de charges peut être converti en un courant de spin transverse et l'effet Hall de spin inverse qui permet la conversion inverse. Cet effet de génération de courant de spin grâce à l'interaction spin-orbite peut aussi être mis à profit pour le retournement de l'aimantation dans des mémoires magnétiques. L'un des

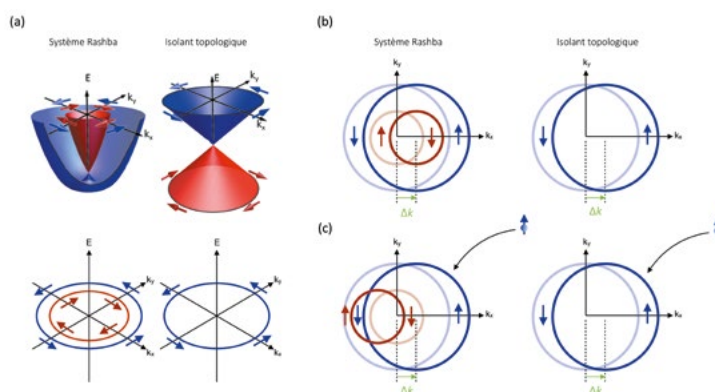


Fig. 1. (a) Dispersions  $E(k)$  des états bidimensionnels de surface ou d'interface dans un système Rashba et dans un isolant topologique. Les systèmes Rashba présentent des contours de Fermi (ensemble des valeurs de  $k_x$  et  $k_y$  correspondant à l'énergie de Fermi, soit le niveau de remplissage de la bande de conduction dans le cas présent) circulaires avec des polarisations en spin tangentielles dans des directions opposées pour chacun des contours (rouge et bleu sur la figure). Les isolants topologiques présentent un seul contour de Fermi avec une polarisation en spin tangentielle. (b) Effet Edelstein dans un système Rashba et dans un isolant topologique. Un courant électrique suivant  $k_x$  correspond à un surplus de vecteur d'onde  $\Delta k$  pour les états électroniques au niveau de Fermi, c'est-à-dire à un décalage  $\Delta k$  des contours de Fermi. Ce décalage conduit à un enrichissement en spin «up» selon  $k_y$  (partiellement compensé dans le cas du système Rashba) et donc à l'apparition d'une polarisation en spin nette selon  $y$ . (c) Effet Edelstein inverse dans un système Rashba et dans un isolant topologique. Un courant polarisé en spin «up», par exemple selon  $y$ , est injecté dans le gaz d'électrons bidimensionnel dans des états de spin «up», donc à  $k_x$  positif. L'accumulation d'électrons de spin «up» conduit donc à un décalage  $\Delta k$  des contours de Fermi qui correspond à un courant électrique selon  $k_x$ .

avantages, comparé aux jonctions tunnel classiques, est que le courant de spin est orthogonal au courant de charge qui ne doit donc pas traverser la jonction tunnel au risque de la dégrader.

Il apparaît aujourd'hui qu'une conversion plus efficace pourrait être obtenue en exploitant les propriétés de polarisation en spin de gaz d'électrons bidimensionnels qui existent à la surface de certains matériaux. Cette polarisation en spin peut résulter de l'interaction spin-orbite générée par le fort gradient de potentiel dû à la rupture de symétrie engendrée par la surface (effet Rashba) ou de la structure électronique particulière existant dans une classe de matériaux appelés isolants topologiques. Dans ces deux familles de matériaux, il existe une texture de spin résultant de la relation existant entre la direction des spins et le vecteur d'onde  $k$  des états électroniques qui sont perpendiculaires. Ainsi, les contours d'énergie constante sont circulaires et la polarisation en spin est tangente à ces cercles (Fig. 1a).

La géométrie particulière de ces textures de spin implique qu'un courant électrique dans ce type de gaz d'électrons 2D s'accompagne automatiquement de l'apparition d'une polarisation en spin, c'est-à-dire d'une accumulation de spin dans la direction perpendiculaire au courant. Il s'agit de l'effet Edelstein (Fig. 1b) qui peut être assimilé à un phénomène de conversion charge - spin.

L'effet Edelstein inverse existe aussi et correspond à la conversion inverse spin - charge (Fig. 1c). Dans ce cas, l'injection d'un courant de spin vertical possédant une polarisation, par exemple un spin « up », conduit à l'apparition d'un courant électrique dans le gaz bidimensionnel d'électrons.

Le but de ce travail [1] était d'étudier l'existence d'un effet Edelstein inverse dans  $\alpha$ -Sn(001) dont les propriétés d'isolant topologique ont été récemment mises en évidence [2] et une efficacité de conversion spin - charge jamais atteinte jusqu'à présent a été observée. Pour pouvoir observer cet

effet, et il est nécessaire d'injecter dans l'isolant topologique des électrons polarisés en spin. D'un point de vue pratique, cela nécessite la croissance d'un film mince ferromagnétique sur l'isolant topologique. Pour intégrer ces états de surface dans des composants spintronique, il est donc intéressant de suivre l'évolution de ces états lorsqu'ils sont recouverts par un matériau. Des films minces de 30 plans atomiques de  $\alpha$ -Sn(001) constituant l'isolant topologique de départ, ont donc été déposés par épitaxie par jet moléculaire sur InSb(001). Ils ont ensuite été caractérisés par photoémission angulaire (ARPES) puis ont été recouverts par des films de différentes épaisseurs de Fe et d'Ag.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 2. Les cônes de Dirac observés sur les surfaces  $\alpha$ -Sn(001) nues sont caractéristiques d'un état de surface topologique. Le point de Dirac (qui correspond aux sommets confondus des cônes inférieur et supérieur) est situé à environ 30 meV sous le niveau de Fermi. On observe que cet état topologique disparaît dès que la surface  $\alpha$ -Sn(001) est couverte par une fraction de plan atomique de Fe tandis qu'il subsiste quand la surface est couverte par un film d'argent, même pour une épaisseur allant jusqu'à 12 Å. Le film d'Ag ne détruit donc pas cet état topologique qui subsiste à l'interface mais déplace le point de Dirac vers une énergie de liaison plus élevée (environ 75 meV sous le niveau de Fermi).

Des mesures de pompage de spin par résonance ferromagnétique destinées à mesurer une éventuelle conversion spin - charge ont ensuite été réalisées sur différents empilements : InSb(001)/Fe/Au (pour des mesures de référence sur un film de Fe), InSb(001)/ $\alpha$ -Sn(001)/Fe/Au et InSb(001)/ $\alpha$ -Sn(001)/Ag/Fe/Au. Le principe de ces mesures consiste à appliquer un champ magnétique statique dans le plan des films minces de façon à générer une aimantation macroscopique dans la couche de Fe puis à appliquer, dans la direction

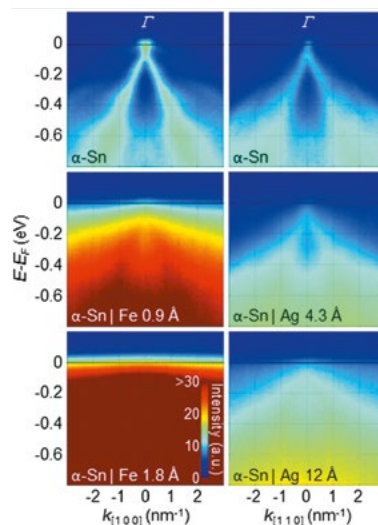


Fig. 2 Etat de surface de  $\alpha$ -Sn mesuré par ARPES pour des surfaces nues (haut) puis couvertes de films de Fe (gauche) et d'Ag (droite) de différentes épaisseurs.

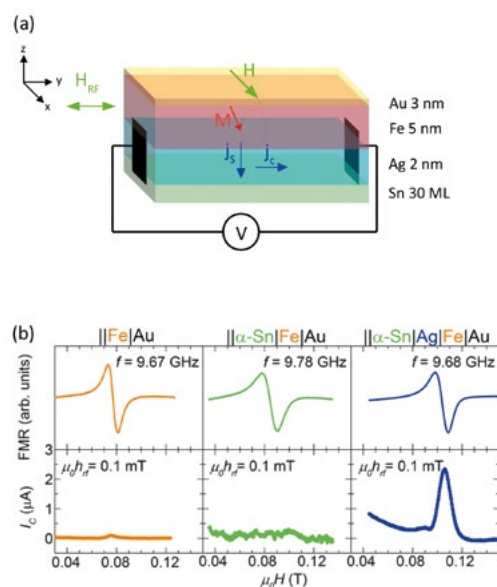


Fig. 3 (a) Schéma de la situation expérimentale permettant de réaliser les expériences de pompage de spin. Le champ magnétique  $H$  appliqué selon la direction  $x$  oriente l'aimantation macroscopique  $M$  du Fe qui précède sous l'effet du champ radiofréquence  $H_{RF}$  appliqué selon la direction  $y$ . Cette précession entraîne l'injection dans les couches non magnétiques selon la direction  $z$  d'un courant de spin  $j_s$  qui est finalement converti en un courant de charges  $j_c$  selon la direction  $y$  et détecté ici par la différence de potentiel apparaissant entre les bords de l'échantillon. (b) Résultats de résonance ferromagnétique (haut) et mesures du courant de charges pour les 3 empilements étudiés (bas).

le plan des films, un champ radiofréquence de fréquence variable qui fait précéder l'aimantation. À la fréquence de résonance, un courant de spin est injecté dans les couches non magnétiques et un éventuel courant de charge peut être détecté par l'apparition d'une tension entre les bords de l'échantillon (Fig. 3a). La figure 3b présente les résultats de résonance ferromagnétique (haut) et le signal de courant de charges pour les 3 empilements (bas). Il a été observé que seul l'échantillon où un film d'Ag est intercalé entre la couche ferromagnétique de Fe et l'isolant topologique  $\alpha$ -Sn(001) (c'est-à-dire lorsque le cône

de Dirac est observé par ARPES) présente un signal clair de courant de charge résultant d'un phénomène de conversion spin - charge. L'efficacité de cette conversion peut être quantifiée par le coefficient  $\lambda_{IEE}$  qui est le rapport du courant de spin injecté sur le courant de charge généré. Une valeur de  $\lambda_{IEE} = 2.1$  nm est trouvée sur ce système ce qui est très supérieur aux valeurs obtenues jusqu'à présent, par exemple à l'interface Bi/Ag ou avec d'autres systèmes Rashba.

Ce résultat prometteur, observé à température ambiante, ouvre la voie à la réalisation de nouveaux compo-

sants d'électronique de spin, et ceci bien que l'origine des états topologiques du  $\alpha$ -Sn n'ait pas encore été entièrement élucidée. D'autres expériences permettront certainement une meilleure compréhension de ce nouvel isolant topologique.

➔ **Contacts:**  
[jean-marie.george@cnsr-thales.fr](mailto:jean-marie.george@cnsr-thales.fr) ;  
[francois.bertran@synchrotron-soleil.fr](mailto:francois.bertran@synchrotron-soleil.fr)

#### Références :

- [1] J.-C. Rojas-Sánchez *et al.* Phys. Rev. Lett. 116, 096602 (2016).  
 [2] Y. Ohtsubo *et al.* Phys. Rev. Lett. 111, 216401 (2013).

### Spintronique

La spintronique - ou électronique de spin - est une nouvelle électronique qui, en plus de la charge de l'électron, exploite son spin. L'idée de base est d'intégrer dans les dispositifs des matériaux ferromagnétiques et d'utiliser l'influence du spin des électrons sur leur mobilité. Par exemple, on peut concevoir des mémoires

vives magnétiques (MRAM) non volatiles dont les briques de base sont des jonctions tunnel magnétiques dans lesquelles le bit d'information 0 ou 1 correspond à l'orientation parallèle ou anti-parallèle des aimantations de deux couches minces ferromagnétiques séparées par une barrière isolante. La lecture de

l'information se fait grâce à l'effet de magnétorésistance tunnel (la résistance électrique dépend de l'orientation relative des deux aimantations) et l'écriture de l'information se fait grâce à l'injection de courants de spin capables de renverser une aimantation pour des densités de courant suffisamment élevées.

### Isolants topologiques

Parmi beaucoup d'autres propriétés, un matériau peut être soit conducteur, soit isolant. La différence fondamentale à l'origine de l'un ou l'autre de ces états se trouve dans la structure de bande, c'est-à-dire dans la façon dont les électrons sont répartis en énergie de liaison. Dans un conducteur, il existe des états occupés et des états inoccupés au niveau de Fermi et des électrons peuvent acquérir un petit surplus d'énergie pour être mis en mouvement et établir un courant électrique. Dans un isolant, il existe une bande d'énergie interdite (un gap) entre

les états occupés et les états inoccupés et les électrons ne peuvent pas facilement être promus vers des états inoccupés car la différence d'énergie est trop importante. Un courant électrique ne peut donc pas s'établir.

En 2005 et 2007, un nouveau type d'isolant a été prédit théoriquement avant d'être observé expérimentalement pour la première fois en 2007. Dans ces matériaux, une propriété de la structure de bande (sa topologie) combinée à l'interaction spin-orbite engendre l'existence d'états électroniques dans le gap mais uniquement à la surface d'un

matériau 3D (ou sur les bords d'un matériau 2D). Ces états de surface se présentent sous la forme de cônes de Dirac et possèdent à la fois des états occupés et des états inoccupés au niveau de Fermi, condition pour être conducteurs. Un isolant topologique est donc un matériau isolant en volume mais conducteur en surface. De plus, la topologie particulière des états électroniques de ces matériaux fait que ces états de surface conducteurs ne peuvent être détruits par des défauts ou des impuretés non magnétiques, contrairement aux états de surface classiques.