

# Effet tunnel à un électron : Réalisation et applications

**F. ERNULT**, K. YAKUSHIJI, S. MITANI et K. TAKANASHI

Institute for Materials Research, Tohoku University, Katahira 2-1-1 Aoba-ku Sendai

Tel. : 022-215-2097 - Fax. 022-215-2096

E-mail : ernult@imr.tohoku.ac.jp

## Résumé :

Le développement de l'électronique de spin est à l'origine d'une intense recherche dans le domaine des effets à un électron et de l'accumulation de spin.

Notre laboratoire participe à cet effort et plusieurs séries de nanoparticules ont été préparées de façon à mesurer leurs propriétés structurales et électriques, et en particulier l'apparition de l'effet tunnel à un électron. Les mesures effectuées à basse température sur des échantillons à base de particules de Co ont clairement indiqué la présence de cet effet sous la forme de l'escalier de Coulomb. L'analyse des résultats par simulation numérique a permis d'estimer le temps de relaxation de spin dans les particules à environ 150ns, soit plus de 10000 fois plus long que dans le Co massif. Cette forte augmentation pourrait être utilisée dans les futurs ordinateurs quantiques.

Parallèlement, les conditions de préparation des particules ont été optimisées de façon à uniformiser leurs propriétés macroscopiques. Il a ainsi été démontré qu'il était possible d'induire un phénomène d'auto-organisation en ajustant l'épaisseur des couches inférieures de l'échantillon. Ce phénomène se traduit par l'auto-alignement des particules et conduit à une meilleure uniformité de leurs propriétés macroscopiques.

## Abstract :

スピントロニクスの研究分野ではスピン依存単一電子トンネルおよびスピン注入・蓄積に関する研究が重要である。本研究ではCoナノ粒子のスピン依存伝導とスピン蓄積について調べた。低温における測定では、単一電子トンネル効果によるクーロン階段があらわれた。トンネル磁気抵抗効果のバイアス電圧依存性を数値シミュレーションすることによりスピン緩和時間を評価することができ、150ns程度と見積もられた。これはバルク材より四桁大きい値であることがわかる。その増大を利用して量子計算に応用可能である。

次に、伝導特性の均一性を改善するためにナノ粒子の作製条件を探索した。下地層の厚みを最適化することで粒子配列を自己組織化させることができた。この結果を用いてナノ粒子の自己配列と粒径分布の改善が可能となった。

## Introduction :

Le développement de l'électronique et l'augmentation de la densité des transistors prédite par la loi de Moore sont à l'origine d'une intense recherche dans le domaine de l'effet tunnel à un électron (SET : Single Electron Tunneling). Des transistors basés sur cet effet ayant une taille sensiblement plus faible que les transistors actuels, les processeurs pourront, à taille égale, en intégrer un plus grand nombre.

L'effet tunnel à un électron apparaît essentiellement dans des particules métalliques séparées d'électrodes par des jonctions tunnel et est basé sur le rapport entre l'énergie de charge (énergie nécessaire à l'injection d'un nouvel électron) et l'activation thermique (énergie apportée par la température de l'environnement). L'énergie de charge d'une particule est inversement proportionnelle à sa taille et peut donc dépasser l'énergie d'activation thermique lorsque la taille de la particule diminue. Dans ce cas, le courant traversant la particule augmente par paliers avec une

période :  $e^2/C$  (où  $e$  est la charge de l'électron et  $C$  est la capacité de la particule) lorsque la tension appliquée augmente. Ce phénomène est couramment appelé « Escalier de Coulomb » et permet de contrôler avec précision le nombre d'électrons injectés dans la particule.

Si des matériaux magnétiques sont employés pour la préparation des électrodes, il est également possible de mesurer un effet de magnéto-résistance tunnel (souvent noté TMR : Tunnel Magneto-Resistance) correspondant à une variation de la résistance électrique de l'échantillon en fonction du champ magnétique qui lui est appliqué. Les effets de charge précédemment décrits se combinent alors avec cet effet de magnéto-résistance tunnel et donnent lieu à des phénomènes tels que l'oscillation de la magnéto-résistance par exemple. Ces effets peuvent donner lieu à de nouvelles applications dans le domaine de l'électronique de spin.

D'un point de vue expérimental, l'observation de tels phénomènes nécessite la préparation d'une unique particule de taille nanométrique ou d'un ensemble de particules aux propriétés identiques. Mais les tailles de particule requises pour l'apparition de l'effet tunnel à un électron se situent en deçà des limites des technologies de fabrication actuelles et il est donc nécessaire de réfléchir à de nouvelles solutions.

Nos travaux ont donc porté sur la préparation de nanoparticules métalliques par diverses techniques afin de contrôler leur distribution de taille, et sur la mesure de leurs propriétés de transport.

Dans un premier temps, des particules de Co ont été préparées dans une matrice isolante d'Al-O. La structure des échantillons est : Al/Al-O/Al-O-Co/Co. Les propriétés de transport mesurées à 4.2K ont permis de mettre en évidence la présence d'un escalier de Coulomb et d'oscillations de la magnéto-résistance. Ces oscillations entraînent un changement périodique du signe de l'amplitude de magnéto-résistance en fonction de la tension appliquée, effet qui ne peut être expliqué par les théories de l'effet tunnel classique. Afin de déterminer l'origine de ce phénomène, les courbes expérimentales ont été modélisées en ayant recours à la simulation numérique. Le modèle employé est basé sur l'hypothèse d'un effet tunnel séquentiel et a permis de mettre en évidence le rôle prépondérant joué par l'accumulation de spin dans nos échantillons. Le meilleur fit de la courbe expérimentale (voir figure 1) a été obtenu pour un temps de relaxation de spin  $\tau_{SF} = 150$  ns [1]. Cette valeur est bien supérieure au temps mesuré dans le Co massif (de l'ordre de quelques dizaines de picosecondes) et indique ainsi que la réduction de la dimensionalité permet de réduire considérablement la diffusion de spin. Ce résultat ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation de nanoparticules au sein des orfinateurs quantiques.

Dans un second temps, afin de mieux contrôler la taille des particules et s'assurer ainsi de l'uniformité de leurs propriétés, plusieurs séries d'échantillons contenant un seul et unique plan de particules inséré entre deux jonctions tunnel ont été préparées par épitaxie par jets moléculaires. Ces échantillons sont basés sur des jonctions Fe/MgO/Fe. La structure des échantillons est la suivante :

MgO, 10 nm/Fe, 1 nm/MgO, 1 nm/ Particules Fe/MgO, 3 nm/Electrode de Fe ou Co

La technique de l'épitaxie par jets moléculaires

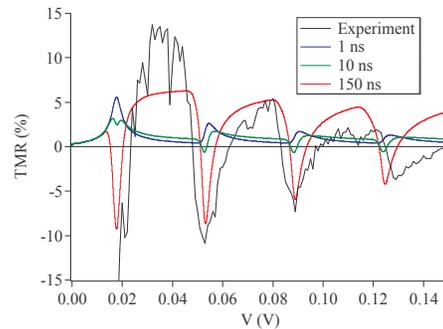


Fig. 1 : Courbe expérimentale de magnéto-résistance pour des particules de Co dans une matrice d'Al-O et fits pour divers temps de relaxation de spin.

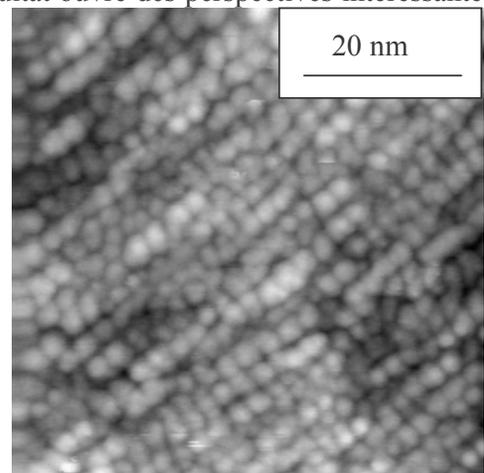


Fig. 2 : Image STM de particules de Fe auto-alignées sur une barrière tunnel de MgO.

de

permet un excellent contrôle des interfaces et de la cristallinité des échantillons. Les résultats obtenus dans des échantillons préparés par cette technique peuvent donc être plus aisément comparés aux prédictions théoriques.

Les mesures de transport effectuées à 4.2K dans le cas de particules de Fe montrent des oscillations de magnétorésistance dont la période est compatible avec la taille des particules estimées par microscopie à effet tunnel.

Les conditions de dépôt ont été optimisées afin d'obtenir des particules auto-alignées (voir figure 2). Cet effet d'auto-alignement repose sur la structure de la surface de l'électrode inférieure de Fe qui peut être modifiée en faisant varier son épaisseur. Pour une épaisseur d'environ 8nm, la surface comporte des facettes pyramidales dont la position est liée à celle des dislocations dues au désaccord de maille entre la couche initiale de MgO et l'électrode de Fe. Une fois recouvertes par la barrière de MgO, ces facettes jouent le rôle de « template » lors de la croissance des particules de Fe.

La préparation de particules métalliques ferromagnétiques et la mesure de leurs propriétés électriques ont permis de mettre en évidence un allongement notable du temps de relaxation de spin susceptible de trouver des applications en électronique de spin et d'améliorer notre compréhension des phénomènes électroniques dans des systèmes de faible dimensionalité. Un premier pas a également été franchi vers la préparation de particules dotées d'une faible distribution de leurs propriétés et directement intégrées dans un dispositif permettant d'exploiter l'effet tunnel à un electron.

#### **Références :**

[1] K. Yakushiji, F. Ernult, K. Yamane et al., Nature Materials