

# Etude de la précipitation d'agrégats de Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub> dans des couches minces de GeMn déposées par Epitaxie Jets Moléculaires.

J.P. Ayoub<sup>a,\*</sup>, L. Favre<sup>a</sup>, I Berbezier<sup>a</sup>, A. Ronda<sup>a</sup>, L. Morresi<sup>b</sup>, N. Pinto<sup>b</sup>

<sup>a</sup> L2MP, Université Paul Cézanne, Avenue Escadrille Normandie Niemen - Case 142. 13397 Marseille Cedex 20

<sup>b</sup> CNISM/INFN-Dipartimento di Fisica, Università di Camerino, I-62032 Camerino, Italy

---

**Résumé** – Nous présentons dans cette étude, les analyses en microscopie électronique à transmission, obtenues pour des systèmes germanium-manganèse Ge<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub> (1% $\leq$ x $\leq$ 5.1%). Il est montré que dans nos conditions expérimentales, il existe une concentration critique x<sub>c</sub>, en dessous de laquelle il est possible de réaliser des couches minces de Ge dopé Mn (sur des sites substitutionnel et/ou interstitiels). Au dessus de cette concentration, la formation d'agrégats riches en Mn est observée. L'indexation des clichés de diffraction électronique obtenus sur des zones riches en agrégats, a permis l'identification de la phase hexagonale ferromagnétique Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub> et des relations d'épitaxie. Les propriétés magnétiques des couches étudiées sont corrélées à la présence de ces agrégats et à leurs relations d'épitaxie.

---

## 1. Introduction

Récemment les avancées technologiques dans l'élaboration des couches minces et la compréhension des phénomènes de transport électronique ont permis des progrès considérables dans la miniaturisation et la diversification des dispositifs électroniques. Les propriétés ferromagnétiques des hétérostructures semi-conductrices permettent de manipuler non seulement les porteurs de charges électriques (électrons, trous), ce qui est le cas dans l'électronique classique, mais aussi leur spin. De nombreux efforts ont été concentrés sur l'injection directe de spins polarisés à l'aide d'une couche de métal ferromagnétique déposée sur un semi-conducteur. Malheureusement, la dépolarisation des porteurs lors du franchissement de l'interface limite cette technologie. Une alternative consiste en l'utilisation des semi-conducteurs magnétiques dilués (DMS), qui permettent une ingénierie de spin assez vaste et une injection de spin plus efficace que si l'on utilise les techniques habituelles des hétérostructures semi-conductrices. Différents semi-conducteurs dilués sont actuellement à l'étude : GaMnN, ZnCoO, GaMnAs, CdMnTe, GeMn, ... . Les travaux concluent que l'effet ferromagnétique est attribué au rôle des porteurs et à la densité des dopants.

## 2. Résultats

Nous avons choisi d'étudier le système Ge<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>, qui est compatible avec la technologie actuelle de la microélectronique. Les premières études effectuées sur ce système ont montré l'obtention d'une réponse ferromagnétique avec une température de Curie (T<sub>C</sub>) comprise entre 25 et 116 K [1]. Des études plus récentes montrent la possibilité de réaliser des structures (types nanofils) ayant une T<sub>C</sub> d'environ 400 K [2].

Nous avons effectué des analyses structurales en microscopie électronique à transmission (MET) sur des couches minces de Ge<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub> (avec x = 1, 3.3 et 5.1%), préparées par épitaxie par jets moléculaires sur un substrat de Ge(100) à une température de croissance de 160°C.

Nos observations révèlent l'existence d'une concentration limite en Mn (x<sub>c</sub>~2%), en dessous de laquelle il est possible de réaliser des couches minces dans lesquels le Mn est dilué dans la matrice sur des sites substitutionnel et/ou interstitiels. Au dessus de cette concentration, nous observons l'apparition d'agrégats enrichis en Mn. La distribution inhomogène en Mn à travers la couche de Ge<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub> est mise en évidence par spectroscopie de rayons X (EDX) et par spectroscopie de perte d'énergie (EELS) couplées à un microscope électronique à transmission. L'indexation des clichés de diffraction électronique obtenus à partir de zones riches en agrégats, a permis l'identification de la phase hexagonale ferromagnétique Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub> et des relations d'épitaxie. Nous avons mis en évidence les relations d'épitaxie suivantes : (002)<sub>Ge</sub> // (0002)<sub>Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub></sub> and (2-20)<sub>Ge</sub> // (03-30)<sub>Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub></sub>. Ces relations sont confirmées par la mesure des périodes des moirés sur les images MET. Les mesures magnétiques (MOKE) montrent la présence d'une anisotropie magnétique où l'axe facile d'aimantation est parallèle à la direction [001]<sub>Ge</sub> de croissance. D'après nos résultats, cet axe est donc aussi parallèle à l'axe C [0002]<sub>Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub></sub> des agrégats de Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub>. Ce résultat montre l'influence des précipités de Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub> sur les propriétés ferromagnétiques.

---

\* Auteur à contacter : jean-pierre.ayoub@l2mp.fr – Tel : 04 91 28 91 64

### 3. Conclusion

Grâce aux analyses MET effectuées nous avons mis en évidence que l'origine du ferromagnétisme dans les échantillons était principalement liée à la présence d'agrégats de Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub>. En effet d'une part l'augmentation du signal est corrélée à l'augmentation de la densité des agrégats. D'autre part, l'anisotropie magnétique est aussi expliquée par la relation d'épitaxie des agrégats de Ge<sub>3</sub>Mn<sub>5</sub> qui sont positionnés de telle façon que l'axe facile d'aimantation coïncide avec l'axe de croissance.

### 4. Références

- [1] Y. D. Park , A. T.Hanbicki, S. C. Erwin, C.S. Hellberg, J. V. Sullivan, J. E. Mattson, T. F. Ambrose, A. Wilson, G. Spanos, B. T. Jonker, *Science* **295**, 651 (2002).
- [2] M. Jamet, A. Barski, T. Devillers, V. Poydenot, R. Dujardin, P. Bayle-Guillemaud, J. Rothman, E. Bellet-Amalric, A. Marty, J. Cibert, R. Mattana and S. Tararenko, *Nat. Mat.* **5**, [2006]