

Titre : Dynamique d'ondes de spin dans des microstructures à base de films de YIG ultra-minces : vers des dispositifs magnoniques radiofréquences

Mots clés : ondes de spin, YIG, nanofabrication, couple spin-orbite, magnonique

Résumé : Cette thèse porte sur l'étude de la génération, la propagation et la détection d'ondes de spin dans des nanostructures et microstructures élaborées à partir de couches ultra-minces (quelques nanomètres d'épaisseur) de $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG). Ce travail se trouve à l'interface entre deux thématiques du magnétisme : la magnonique et la spintronique. Grâce aux effets spin-orbite dans des microstructures YIG|Pt, il a été possible d'étudier et de manipuler la dynamique d'aimantation du YIG, un matériau utilisé de longues dates sous forme de films épais ou billes pour ses très faibles pertes magnétiques. Ce travail ouvre la voie au développement de circuits magnoniques submicroniques soit pour le traitement des signaux hyperfréquences pour les applications télécom soit pour la réalisation de circuits logiques dans la perspective du remplacement de la technologie CMOS (*beyond-CMOS*).

Ce travail repose sur une expertise dans la croissance de films de YIG développée au laboratoire. Les couches ultra-minces de YIG utilisées ont été élaborées par ablation laser pulsée. Pour les meilleurs films ayant une épaisseur de 20 nm, la constante d'amortissement de Gilbert caractérisant les pertes des films, estimée par résonance ferromagnétique, est typiquement de 3×10^{-4} . Cette avancée cruciale sur l'aspect matériau a ouvert au début de ma thèse un champ de possibilités pour la réalisation et l'étude de dispositifs magnoniques. En effet, la diminution des épaisseurs a permis d'ouvrir le YIG au domaine de la micro/nanofabrication, levant ainsi un verrou technologique vieux de plusieurs décennies. Nous avons donc pu montrer par des mesures inductives et optiques que la propagation d'ondes de spin dans des guides d'onde de YIG de 20 nm d'épaisseur pouvait être faite sur plusieurs dizaines de microns. Prouvant que la structuration des films de YIG n'altère pas la propagation des ondes de spin, cela nous ouvre la voie vers la réalisation de circuits magnoniques plus complexes.

En structurant ces films de YIG pour obtenir des cristaux magnoniques, il est possible de générer une modulation spatiale du potentiel vu par les ondes de spin, se traduisant par l'apparition de bande interdite (ou gap) dans la transmittance de fréquences. L'étude de la propagation des ondes de spin dans un cristal a montré l'apparition d'un gap par des mesures BLS, accompagnée par une augmentation de l'atténuation pour la longueur d'onde de Bragg. Pour la première fois dans des films ultra-minces de YIG, ce gap montre la possibilité de réaliser une fonctionnalité de filtrage fréquentiel. La preuve de concept a été validée pour un cristal magnonique adapté pour l'intégration à des dispositifs magnoniques.

Afin de manipuler et d'exciter la dynamique d'aimantation du YIG, nous avons dans une deuxième partie réalisée des microstructures à base de bicouche YIG|Pt. L'injection d'un courant électrique dans le Pt donne naissance, grâce à l'effet Hall de spin, à une accumulation de spin qui se couple à l'interface avec l'aimantation du YIG et permet ainsi d'exercer un couple de transfert de spin (STT) et de générer une dynamique d'aimantation du YIG. Nous avons mis en évidence la modulation d'un facteur cinq de la longueur d'atténuation des ondes de spin se propageant dans une piste YIG|Pt grâce à l'amplification des ondes de spin par STT. Ce contrôle efficace de l'atténuation s'avère très intéressant pour le transport d'information porté par les ondes de spin, afin d'amplifier ou supprimer les ondes de spin et donc de sélectionner l'information transmise.

Par ailleurs, au-delà d'un courant critique d'injection, nous avons pu observer des auto-oscillations de l'aimantation du YIG à la fois dans des plots ou des pistes. Ce résultat confirme la possibilité d'exciter électriquement la dynamique d'aimantation du YIG par STT. Une étude rigoureuse de ce régime a été effectuée dans des microdisques YIG|Pt pour déterminer le comportement des auto-oscillations et imager les modes d'ondes de spin excités dans le YIG.



Title : Spin waves dynamics in microstructures based on ultrathin YIG films : towards radiofrequency magnonic devices

Keywords : spin waves, YIG, nanofabrication, spin-orbit torque, magnonic

Abstract : The aim of this thesis is to study the generation, propagation and detection of spin waves in nanostructures and microstructures based on ultrathin (a few nanometers thickness) $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) films. This work is at the interface between two fields of magnetism: magnonics and spintronics. Thanks to spin-orbit effects in YIG|Pt microstructures, it has been possible to study and manipulate YIG magnetization dynamic, a material known and used for a long time as thick films or spheres due to its very low magnetic losses. This work opens the path towards the development of submicronic magnonic circuits either for processing radiofrequency signals or for the realization of spin waves logic devices for a future beyond-CMOS technology.

Prior to the present work, a significant effort has been made in the lab to grow epitaxial nanometer thick YIG films by pulsed laser deposition (PLD). It was possible to reduce the film thickness down to a few nanometers while preserving excellent magnetic properties. For the best YIG films having a thickness of 20 nm, ferromagnetic resonance measurements yield a Gilbert magnetic damping of 3×10^{-4} . This value is comparable to micrometer thick YIG films grown by liquid phase epitaxy (LPE).

This important step forward on the material aspect opened new possibilities for the realization of magnonic devices that can have a large impact on the ICT industry. Indeed, microfabrication of YIG is now possible thanks to the advent of high quality nanometer thick YIG films. Thus, we have observed the propagation of spin waves in 20-nm thick, 2.5 μm wide YIG waveguides over large distances using inductive and optical detection. Spin-wave propagation characteristics are not affected by microstructuration opening the path to the reliable design of complex magnonic circuits.

By structuring YIG films to obtain magnonic crystals, it is possible to generate spatial modulation of the potential seen by spin waves, resulting in the appearance of gaps in the transmittance in frequency. To do so, magnonic crystals implemented in form of microscopic waveguides whose width is periodically varied, were fabricated. The study of spin-wave propagation showed the appearance of a gap accompanied by an increase of the spin-wave attenuation length due to Bragg reflection. For the first time in ultrathin YIG films, this gap shows the possibility to realize radiofrequency filtering.

In order to manipulate and excite YIG magnetization dynamics, we have designed YIG|Pt microstructures either stripes or microdisks. Thanks to the spin Hall effect, an electrical current passing in Pt generates a transverse spin accumulation coupled at the interface to the YIG's magnetization making it possible to exert spin transfer torque (STT). We have highlighted an efficient modulation, by a factor of five, of the spin-wave attenuation length. This control on the decay constant proves to be very interesting for the transport of information using spin waves as data carriers, in order to be able to amplify or suppress spin waves and to select transmitted information.

In addition, beyond a critical current, we have induced auto-oscillations of YIG magnetization, either in stripes or microdisks, confirming the possibility to electrically excite YIG magnetization dynamics using STT. A rigorous study of this nonlinear regime has been carried out in YIG|Pt microdisks to determine auto-oscillations behavior and to observe directly dynamic modes excited in YIG.

