

Epitaxial growth from liquid phase of monocrystalline layers of $Y_3Fe_5O_{12}$ in molten salts without lead

Context and objectives of the PhD

Yttrium iron garnet, $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG), is a ferrimagnetic insulator with unique properties, such as a very high Faraday rotation angle and record coherence for magnetization dynamics. It has many applications in electronics, serving in tunable microwave devices (for remote detection and transmission of information), microwave circulators, optical insulators, etc. The manufacture of integrated magnonic devices, which extend the above applications to micro- and nanometric scales, requires the epitaxial growth of magnetic insulators in thin ($< 10 \mu\text{m}$) and/or very thin ($< 100 \text{nm}$) films. Currently, LPE (Liquid Phase Epitaxy)-grown YIG thin films (thicknesses ranging from a few μm to a few nm) are at the heart of the needs of several research themes developed in the Grenoble environment, notably integrated microwave devices, microwave-optical transduction, or ultra-coherent magnonics at low temperatures, and are the key to numerous experimental breakthroughs. This thesis will focus on the growth of ultra-thin YIG layers by LPE in Pb-based and Pb-free solvents. Thermodynamic modeling studies will be used to determine the choice of solvents. Their structural properties and magnetization dynamics will be measured by ferromagnetic resonance. The final aim of the work is to define Pb-free fluxes which can match or even improve the magnetic properties of YIG, compared to Pb-based fluxes. This thesis will be integrated in a collaborative work with several partner teams relying on iron garnet films for their investigations.

Studies and methods

Crystal growth of $Y_3Fe_5O_{12}$ layers by LPE:

Highly experimental part: Study of the thermochemical and physicochemical properties of the growth solutions studied / Determination of experimental parameters for the growth of YIG thin films of excellent crystalline quality.

Determination of the magnetization dynamics/Structural properties:

Characterization of the grown layers: by Faraday (or Kerr) domain imaging / by ferromagnetic resonance spectroscopy / by X-ray diffraction.

Thermodynamic modeling of Pb-free chemical systems:

Bibliographical research for thermodynamic data / CALculation of phase diagrams to model thermodynamic properties (CALPHAD).

Host teams and PhD organization

The heart of the thesis will be realized in the high temperature solution growth facilities of the technical services *Cristaux Massifs* (CM) at the Institut Néel. This technical services and the *OPTique et MATériaux* (OPTIMA) research team already have extensive experience of growing oxide crystals and epitaxial layers by the flux method [1]. This thesis work will also rely on close collaboration with the *Thermodynamique, modélisation, Optimisation des Procédés* (TOP) team of the *de Science et ingénierie des matériaux et des procédés* (SIMaP) laboratory to develop new PbO-free fluxes and benefit from their expertise in thermodynamics to identify, compare and predict the potential of several substitutions [2]. The quality of the grown layers will preferably be determined through the measurement of magnetic resonance properties. This magnetic characterization will benefit from the expertise of the *Micro et NanoMagnétisme* (MNM) and *Nano-Optique et Forces* (NOF) group at Institut Néel [3]. The thesis will therefore be carried out jointly at Institut Néel (<https://neel.cnrs.fr/>) and SIMaP (<https://simap.grenoble->

inp.fr/). These two Grenoble laboratories are well connected by bicycle paths and direct public transport.

Profile and skills required

The candidate should hold a master degree in Material Science/Solid-state Chemistry/Condensed Matter Physics, ideally including training in Structure of Mater/Crystal Growth/X-ray Diffraction. We are looking for a candidate with a strong motivation for synthesis/experimental work and showing a keen interest in fundamental understanding of the relationships between structure and materials properties. Practical knowledge in how to use data processing tools is also required. Team work as well scientific communication and writing skills will be essential all along the PhD.

Application procedure

Please send us your CV, covering letter and M1 and M2 transcripts as a single pdf file. Please include in your CV the names and e-mail addresses of at least two referees.

The **thesis** is due to **start in autumn 2025**.

Contacts : alexander.pisch@simap.grenoble-inp.fr et alexandra.pena@neel.cnrs.fr

References

- [1] A. Peña et al., CrystEngComm. **20**, 7502 (2018); A. Peña et al., Opt. Mater. **164**, 11702 (2025).
- [2] W. Abdul, -A. Pisch et al., Cem Concr Res. **173**, 107309 (2023); L. Xuan, A. Pisch et al., Cryst. Growth Des.**22**, 2407 (2022).
- [3] W. Legrand et al., Adv. Funct. Mater. 2503644 (2025). (*early view*)

Croissance épitaxiée en phase liquide de couches monocristallines de $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) dans des sels fondus sans plomb

Contexte scientifique et objectifs de la thèse

Le grenat de fer et d'yttrium, $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG), est un isolant ferrimagnétique qui présente des propriétés uniques, comme par exemple un angle de rotation Faraday très élevé et une cohérence record pour la dynamique d'aimantation. Il trouve de nombreuses applications en électronique, servant dans les dispositifs micro-ondes accordables (pour la détection et la transmission d'information à distance), les circulateurs micro-ondes, les isolateurs optiques, etc. La fabrication de dispositifs magnoniques intégrés, qui étendent les applications ci-dessus aux échelles micro et nanométriques, requiert la croissance épitaxiale d'isolants magnétiques en couches minces ($< 10 \mu\text{m}$) et/ou très minces ($< 100 \text{nm}$). Actuellement des couches minces (d'épaisseurs allant de quelques μm à quelques nm) de YIG de grande qualité croites par LPE sont au cœur des besoins de plusieurs thématiques de recherche développées dans l'environnement grenoblois, notamment les dispositifs micro-ondes intégrés, la transduction microonde-optique, ou la magnonique ultra cohérente à basse température et sont la clé de nombreuses percées expérimentales. Cette thèse va se construire autour de la croissance de couches ultra minces de YIG par LPE dans des solvants à base de Pb et sans Pb. Des études de modélisation thermodynamique seront utilisées pour déterminer le choix des solvants. Leurs propriétés structurales et des dynamique d'aimantation seront mesurés par résonance ferromagnétique. L'objectif final de ce travail est d'utiliser des flux sans Pb qui peuvent égaliser ou même améliorer les propriétés magnétiques du YIG, par rapport aux flux à base de Pb. Cette thèse s'inscrit dans un travail collaboratif intégrant plusieurs équipes partenaires qui vont utiliser des films de grenat de fer pour leurs recherches.

Nature des travaux et compétences développées

Croissance cristalline de couches minces de $Y_3Fe_5O_{12}$ par LPE :

Partie de synthèse très expérimentale : Étude des propriétés thermochimiques et physico-chimiques des solutions de croissance étudiées / Détermination des paramètres expérimentaux pour la croissance de couches minces de YIG de très bonne qualité cristalline.

Détermination dynamique d'aimantation/Propriétés structurales :

Caractérisation des couches obtenues : Par imagerie des domaines par effet Faraday (ou par effet Kerr) / par Spectroscopie par résonance ferromagnétique / par Diffraction de rayons X

Modélisation thermodynamique systèmes chimiques sans Pb :

Recherche bibliographique de données thermodynamiques / CALcul des Diagrammes de Phase pour modéliser les propriétés thermodynamiques (CALPHAD)

Equipes d'accueil et organisation de la thèse

Le cœur de la thèse va se situer dans les installations de croissance en flux du pôle Cristaux Massifs (CM) de l'Institut Néel. Ce pôle technologique et l'équipe de recherche OPTique et MATériaux (OPTIMA) ont déjà une longue expérience sur la croissance de cristaux d'oxydes et des couches épitaxiales par flux [1]. Ces travaux de thèse vont aussi s'appuyer sur une collaboration étroite avec l'équipe Thermodynamique, modélisation, Optimisation des Procédés (TOP) du laboratoire de Science et ingénierie des matériaux et des procédés (SIMaP)

pour développer de nouveaux flux sans PbO et bénéficier de leur expertise en thermodynamique pour identifier, comparer et prédire le potentiel de plusieurs substitutions [2]. La détermination de la qualité des couches élaborées sera préférentiellement déterminée à travers la mesure des propriétés de résonance magnétique. Cette caractérisation magnétique bénéficiera de l'expertise du groupe de Micro et NanoMagnétisme (MNM) et Nano-Optique et Forces (NOF) de l'Institut Néel [3]. La thèse donc va se dérouler conjointement à l'Institut Néel (<https://neel.cnrs.fr/>) et au SIMaP (<https://simap.grenoble-inp.fr/>). Ces deux laboratoires grenoblois sont bien connectés par des pistes cyclables et par une liaison directe par transport en commun.

Compétences et qualités recherchés

Le (la) candidat(e) sera titulaire d'un M2 en Science des Matériaux/Chimie de l'état solide/Physique de la Matière Condensée, incluant idéalement une formation initiale en Structure de la Matière/Croissance Cristalline/Diffraction des Rayons X. Nous cherchons un/une candidat/e fortement motive/eé pour la synthèse/travail expérimentale et montrant un grand intérêt pour la compréhension fondamentale des relations structure-propriétés (magnétiques) des matériaux. Une connaissance pratique des outils de traitement des données est aussi demandée. Une prédisposition à travailler en équipe et une facilité pour l'écriture scientifique en anglais seront indispensables au cours de la thèse.

Pour candidater

Merci de nous faire parvenir un CV, une lettre de motivation, les relevés de notes obtenues en M1 et M2 sous la forme d'un seul fichier au format pdf. Merci d'indiquer dans votre CV les noms, adresses e-mail de deux personnes référentes au moins.

Le **début** de la **thèse** est prévu en **automne 2025**.

Contacts : alexander.pisch@simap.grenoble-inp.fr et alexandra.pena@neel.cnrs.fr

Références

- [1] A. Peña et al., CrystEngComm. **20**, 7502 (2018); A. Peña et al., Opt. Mater. **164**, 11702 (2025).
- [2] W. Abdul, -A. Pisch et al., Cem Concr Res. **173**, 107309 (2023); L. Xuan, A. Pisch et al., Cryst. Growth Des. **22**, 2407 (2022).
- [3] W. Legrand et al., Adv. Funct. Mater. 2503644 (2025). (*early view*)