

Thesis subject proposed at the Institute of Physics of Rennes, France

Materials and Light Department

Research subject: Creation of new materials for information technologies in the THz spectral domain

Funding: Doctoral contract of the University of Rennes 1

Thesis supervisors: Niels Keller (Research Director) / Olena Popova (Research Engineer)

Positioning of the scientific project:

THz information technology is based on the availability of THz radiation sources and detectors in this frequency range. Very often, sources and detectors are almost identical. However, the use of THz radiation for information technology also requires active optical elements to modulate the intensity of the radiation, to switch it between different channels or to code the information through polarization. Contrary to the field of visible or near infrared optics (optical telecommunications field), very few active optical elements are currently available and the field of research is largely open.

This thesis project addresses the possibility of creating new quantum properties in oxide heterostructures and focuses on the interaction of THz radiation with magnetic and multifunctional materials.

To date, the international scientific community in the field of magnetic oxides and spintronics is focusing primarily on a new approach using excitations of the magnetic system of a material, magnons, to develop "robust" information systems that even in the absence of electricity maintain information. The very advanced research is focused on a model material that has been intensively used in the past for the whole field of microwave manipulation, yttrium garnet. [1] The first devices of this magnonics are beginning to be presented, but their spectral range of use is well below THz with typical frequencies of 0.01 THz.

The controlled manipulation of the magnetization in the THz range requires first to increase the magnetic resonance frequencies of the materials by two decades implying the synthesis of new materials with high magnetic anisotropy. The target materials are materials presenting both a magnetic order of antiferromagnetic type (or a weak ferromagnetism) and a ferroelectric order which will respond to excitations by a transient electric field of THz radiation. These are the multiferroic materials. In a recent work, the research group of A. Kimel [2] demonstrated that it is possible to manipulate the magnetization in single crystals of iron-based perovskite (terbium orthoferrite) by THz radiation. [3]

The challenge of designing active systems to manipulate THz radiation will be based on the same principles of interacting magnetic order with THz radiation, but with the difference that magnetic order excitations will be used to modify the THz radiation that interacts with the material.

Project:

It is in this context that the project to study artificial multiferroic materials is inscribed. The underlying physics is related to the phenomenon of charge transfer at the interface between two insulating oxides which at the extreme can result in the creation of a 2D gas confined at the interface (2DEG). This charge transfer at the interfaces can lead to 2DEGs or to new functionalities such as multiferroicity. For the prototype SrTiO₃ /LaAlO₃ (STO/LAO) system the creation of a 2D electron gas has been demonstrated [4].

According to a recent theoretical work, the creation of a multiferroic material is predicted from the two oxides [5]. The aim is to create a new "artificial" oxide having simultaneously a long-range

magnetic and a ferroelectric order by charge transfer. The control of the growth at the level of the elementary will allow in particular to design the spatial symmetry breaking necessary for the creation of the ferroelectric order by charge transfer. The coupling between these electric dipoles and long range magnetism opens the way to study the magnetization dynamics in the THz domain. This family of iron-based perovskite materials is particularly promising to push the frequency limits towards the THz domain.

The challenge of this experimental thesis is to develop the methodology for the synthesis of heterostructures with growth control at the elemental mesh level based on materials that individually do not exhibit multiferroicity. The thesis work will start with growing and establishing the physical properties of individual layers composing the heterostructure. Then the work will focus on the growth of the heterostructures and the study of their properties, in particular the light-matter interaction.

Supervision:

The thesis will be supervised by N. Keller for the research on light-matter interaction and by O. Popova for the material science part. N. Keller and O. Popova will co-supervise the thesis at 50% each.

This thesis aims at training a PhD student in materials science, in particular on the creation of functional oxidic heterostructures via an engineering approach at the level of the elementary cell of oxides.

The thesis work will be carried out at the Institut de Physique de Rennes and will be based on a new pulsed laser deposition facility under UHV. The in-situ monitoring techniques used are spectroscopic ellipsometry, grazing incidence electron diffraction and emission spectroscopy. Standard analysis techniques will be used such as XRD and TEM (in collaboration) to characterize the materials from a structural point of view. Then physical properties such as magnetism, THz optical response and ferroelectricity by KPFM (in collaboration) will also be studied.

Skills and knowledge required

Candidates should have knowledge of materials physics and crystallography. Knowledge of physical vapor deposition techniques for thin film growth would be an advantage. Candidates should be familiar with data analysis and processing. We are looking for candidates with a taste for experimental work in an intercultural team with good communication skills and developing a meticulous approach with an eye for detail.

References :

1. V. E. Demidov, et al J. Appl. Phys. 127 (2020) 17090
2. V. Kimel et al., Nature 435, 655 (2005) ; A. H. M. Reid et al, Appl. Phys. Lett. 106, 082403 (2015)
3. Schlauderer et al, Nature 569 (2019) 383 ; Baierl et al, Nature Photonics 10 (2016) 715
4. G. Herranz et al. Physical Review Letters. 98 (2007) 216803.
5. Xu et al, Phys. Rev. B 93 (2016) 161108

Applications through this web site : https://theses.doctorat-bretagne.fr/3m/theses_2022_3m

Deadline for candidature : May 16th, 2022

Contact :

Niels Keller : niels.keller@univ-rennes1.fr

Olena Popova : olena.popova@univ-rennes1.fr

Sujet de thèse proposé à l'Institut de Physique de Rennes

Département Matériaux et Lumière

Titre de la thèse :

Création de nouveaux matériaux pour les technologies de l'information du domaine spectrale THz

Financement : Contrat doctoral de l'Université de Rennes 1

Porteurs / directeur de thèse : Niels Keller (Directeur de recherche) / Olena Popova (Ingénieure de Recherche)

Positionnement du projet scientifique :

La technologie de l'information THz se base sur la disponibilité de sources de rayonnement THz et de détecteurs dans cette gamme de fréquences. Très fréquemment, sources et détecteurs sont presque identiques. Mais l'utilisation du rayonnement THz pour les technologies d'information nécessite également de disposer d'éléments optiques actifs pour par exemple moduler l'intensité du rayonnement, de le commuter entre différentes voies ou encore de coder l'information à travers la polarisation. Contrairement au domaine d'optique visible ou proche infrarouge (domaine des télécommunications optiques), très peu d'éléments optiques actifs sont actuellement disponibles et le champ de recherche est largement ouvert.

Ce projet de thèse adresse la possibilité de créer des nouvelles propriétés quantiques dans des hétérostructures d'oxydes et se focalise sur l'interaction du rayonnement THz avec des matériaux magnétiques et multifonctionnels.

A ce jour, la communauté scientifique internationale du domaine d'oxydes magnétiques et de l'électronique de spin se focalise en premier lieu sur une nouvelle approche utilisant des excitations du système magnétique d'un matériau, les magnons, pour développer des systèmes d'informations « robustes » qui même en absence d'électricité maintiennent l'information. Les recherches très avancées se focalisent notamment un matériau modèle qui a été dans le passé intensément utilisé pour tout le domaine de manipulation des microondes, le grenat d'yttrium.[1] Les premiers dispositifs de cette magnonique commencent à être présentés, mais leur domaine spectral d'utilisation est bien en déca du THz avec des fréquences typiques de 0.01 THz.

La manipulation contrôlée de l'aimantation dans le domaine THz nécessite d'abord d'augmenter les fréquences de résonance magnétique des matériaux de deux décades ce qui demande la synthèse de nouveaux matériaux à forte anisotropie magnétique. Les matériaux cibles sont des matériaux présentant à la fois un ordre magnétique de type antiferromagnétique (ou ferromagnétisme faible) et un ordre ferroélectrique qui, lui, répondra aux excitations par un champ électrique transitoire du rayonnement THz. Il s'agit des matériaux multiferroïques. Dans un travail récent, le groupe de recherche d'A. Kimel [2] a démontré qu'il est possible de manipuler l'aimantation dans des monocristaux de pérovskite à base de fer (l'orthoferrite de terbium) par rayonnement THz. [3]

L'enjeu de concevoir des systèmes actifs pour manipuler le rayonnement THz reposera sur les mêmes principes d'interaction de l'ordre magnétique avec le rayonnement THz, mais avec la différence que les excitations de l'ordre magnétiques seront utilisées pour modifier le rayonnement THz qui interagit avec le matériau.

Projet :

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet d'étudier des matériaux multiferroïques artificiels. La physique des matériaux sous-jacente est celle liée au phénomène du transfert de charge à l'interface entre deux oxydes isolants qui à l'extrême peut résulter en la création d'un gaz 2D confiné à l'interface (2DEG).

Ce transfert de charge aux interfaces peut conduire à des 2DEG ou à des nouvelles fonctionnalités comme la multiferroïcité. Pour le système prototype SrTiO₃/LaAlO₃ (STO/LAO) cette physique des gaz 2D a été démontrée [4].

Selon un récent travail théorique, la création d'un matériau multiferroïque est prédit à partir des deux oxydes.[5] Il s'agit de créer un nouvel oxyde « artificiel » ayant simultanément un ordre magnétique de longue

portée et un ordre ferroélectrique par transfert de charge. Le contrôle de la croissance au niveau de la maille élémentaire permettra notamment de concevoir la brisure de symétrie spatiale nécessaire pour la création de l'ordre ferroélectrique par transfert de charge. Le couplage entre ces dipôles électriques et le magnétisme de longue portée ouvre la voie pour étudier la dynamique d'aimantation dans le domaine du THz. Cette famille de matériaux pérovskites à base de fer est particulièrement prometteuse pour pousser les limites fréquentielles vers le domaine du THz.

L'enjeu de cette thèse expérimentale est de développer la méthodologie de synthèse d'hétérostructures avec un contrôle de la croissance au niveau de la maille élémentaire se basant sur des matériaux qui individuellement ne présentent pas de multiferroïcité. Le travail de thèse commencera par la démonstration du maintien des propriétés physiques de matériaux individuels composant l'hétérostructure. Par la suite le travail portera sur la réalisation de l'hétérostructure et l'étude de ses propriétés, en particulier de l'interaction lumière-matière.

Encadrement :

La thèse sera encadrée par N. Keller pour la partie recherche sur l'interaction lumière-matière et par O. Popova pour la partie science des matériaux. N. Keller et O. Popova co-encadreront la thèse à 50% chacun.

Cette thèse vise à former un.e doctorant.e en science des matériaux, notamment sur la création d'hétérostructures d'oxydes fonctionnels via une approche d'ingénierie à niveau de la maille élémentaire des oxydes.

Les travaux de thèse seront réalisés à l'Institut de Physique de Rennes et s'appuieront sur une nouvelle installation de dépôt laser pulsé sous UHV. Les techniques de suivi in-situ nécessaires sont l'ellipsométrie spectroscopique, la diffraction électronique en incidence rasante et la spectroscopie d'émission. Les techniques d'analyse standard seront utilisées comme les XRD et le TEM (en collaboration) pour caractériser les matériaux du point de vue structural. Ensuite les propriétés physiques comme le magnétisme, la réponse optique THz et la ferroélectricité par KPFM (en collaboration) seront également étudiés.

Compétences et connaissances recherchées

Les candidat.e.s devront avoir des connaissances en physique des matériaux et en cristallographie. Des connaissances des techniques de dépôt physique en phase vapeur pour la croissance des films minces serait un avantage. Les candidat.e.s devront être familiarisé.e.s avec l'analyse et le traitement de données. Nous cherchons des candidat.e.s avec un goût pour le travail expérimental au sein d'un collectif interculturel ayant de bonnes aptitudes en communication et une approche soignée avec une attention au détail.

Références :

1. V. E. Demidov, et al J. Appl. Phys. 127 (2020) 17090
2. A.V. Kimel et al., Nature 435, 655 (2005) ; A. H. M. Reid et al, Appl. Phys. Lett. 106, 082403 (2015)
3. Schlauderer et al, Nature 569 (2019) 383 ; Baierl et al, Nature Photonics 10 (2016) 715
4. G. Herranz et al. Physical Review Letters. 98 (2007) 216803.
5. Xu et al, Phys. Rev. B 93 (2016) 161108

Déposer votre candidature ici : https://theses.doctorat-bretagneloire.fr/3m/theses_2022_3m

Date limite de candidature : 16 Mai 2022

Contact :

Niels Keller : niels.keller@univ-rennes1.fr

Olena Popova : olena.popova@univ-rennes1.fr