Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg

Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

Band: 96 (2007)

Artikel: Ferroélectricité à l'échelle nanoscopique

Autor: Lichtensteiger, Céline / Triscone, Jean-Marc

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-308875

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ferroélectricité à l'échelle nanoscopique

CELINE LICHTENSTEIGER et JEAN-MARC TRISCONE

DPMC, Université de Genève, 24 Quai Ernest-Ansermet, CH-1211 Genève 4, Suisse

Dans ce bref article, une vue générale des activités de recherche sur la ferroélectricité à l'échelle nanoscopique poursuivies à Genève est présentée.

But général :

Ces recherches sont axées sur l'étude de la croissance et de la physique de structures épitaxiales à base d'oxydes aux propriétés chimiques proches, mais aux propriétés électroniques très différentes.

Nous nous intéressons en particulier à l'étude de matériaux ferroélectriques sous la forme de couches minces et à des matériaux artificiels à base d'isolants diélectriques et ferroélectriques, construits couche par couche. Un autre volet de nos activités concerne l'étude de structures combinant des perovskites ferroélectriques et des oxydes à fortes corrélations électroniques, tels les supraconducteurs à haute température critique.

Dans la direction des matériaux ferroélectriques, les buts recherchés sont :

D'une part de développer une compréhension fondamentale de ces matériaux à une échelle nanoscopique et, d'autre part, d'utiliser les développements dans la préparation de films épitaxiés pour réaliser des matériaux artificiels aux propriétés nouvelles. Un autre défi consiste à transférer les technologies développées sur silicium pour permettre une large exploitation des propriétés exceptionnelles de ces matériaux. Le type de matériaux étudiés est illustré sur la **Figure 1**.

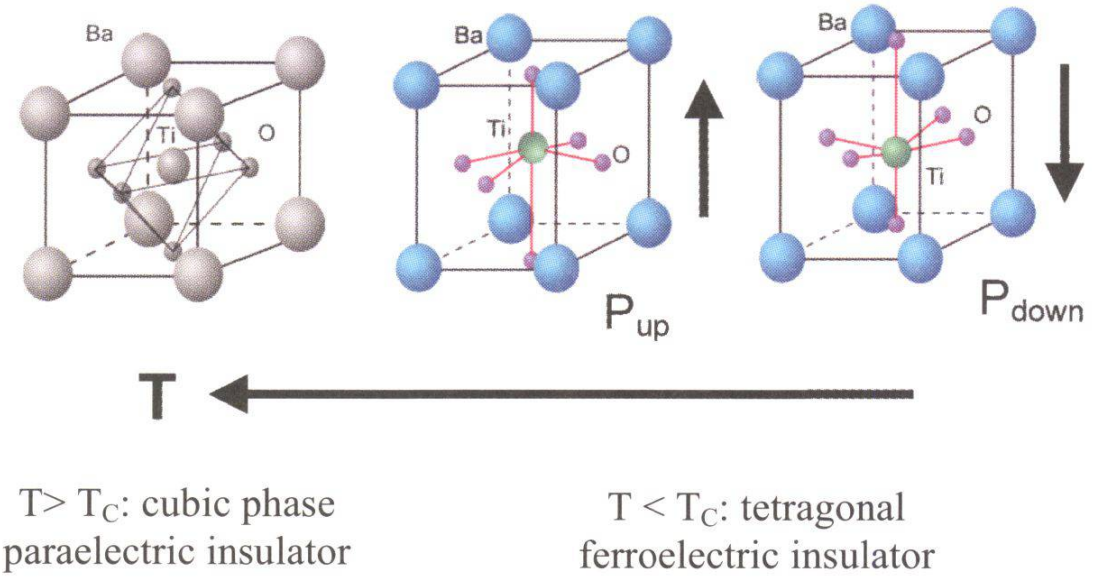

Figure 1 : Les matériaux ferroélectriques étudiés sont des perovskites tels $BaTiO_3$. Au-dessus d'une température critique, le matériau est cubique et paraélectrique. Au-dessous de T_C, il est tétragonal, non-central symétrique, et une polarisation électrique apparaît, son orientation peut-être modifiée par un champ électrique.

Les défis dans cette direction de recherche ont fait l'objet d'une revue :

[1] "*Ferroelectricity at the nanoscale : Local polarization in thin films and heterostructures*", C.H. AHN, K. RABE, and J.-M. TRISCONE, Science **303**, 488 (2004).

Ferroélectricité à l'échelle nanométrique

Les ferroélectriques sont des matériaux qui présentent deux "états électriques" distincts et stables (polarisation). Il est possible, sous application d'un champ électrique, de passer de l'un à l'autre. D'où un lien immédiat avec les mémoires d'ordinateur qui permettent de basculer d'un premier état (appelons-le « 1 »), à un second (le « 0 »), générant ce que l'on appelle un bit d'information. Les matériaux ferroélectriques suscitent, de plus, beaucoup d'intérêt de par leurs autres propriétés remarquables : en effet, ils sont également pyroélectriques, leur polarisation change lorsqu'on les soumet à des différences de températures (utilisation dans des détecteurs infrarouges), et piézoélectriques, c'est-à-dire qu'ils génèrent une tension lorsqu'on les soumet à des contraintes mécaniques (étincelles dans les briquets électroniques ou allume-gaz) et inversement (moteurs piézoélectriques permettant un posi-

tionnement ultra-précis). Des mémoires ferroélectriques permettent de stocker des données de manière permanente, même en l'absence de source de tension, ces mémoires sont dites « non volatiles ». Elles sont basées sur la capacité du matériau à conserver la polarisation (négative ou positive) appliquée *via* un champ électrique qu'on retire ensuite. Les ferroélectriques se développent dans l'électronique : cartes de crédit, cartes SIMS de téléphones portables, cartes d'accès sécurisées, cartes de paiement…, toutes les « smart-cards », désormais si familières, font partie des applications, actuelles ou futures de ces matériaux fascinants.

Afin de permettre une miniaturisation de plus en plus poussée de ces dispositifs électroniques, la compréhension du comportement des matériaux ferroélectriques à l'échelle nanométrique (un nanomètre correspond à un milliardième de mètre) est indispensable et pose des questions fondamentales et des défis technologiques majeurs. Nombre de question-clés sont aujourd'hui étudiées à Genève. Est-il possible d'avoir un matériau aussi mince qu'une dizaine d'atomes et qui présente toujours les mêmes propriétés ? Ces matériaux peuvent-ils être incorporés sur une base connue et largement utilisée aujourd'hui en électronique : le silicium ? Jusqu'à quelle précision peut-on contrôler la polarisation à l'échelle nanométrique ?

Manipulation des domaines ferroélectriques à l'échelle nanométriques - Mémoires à très haute densité

Sur la question des mémoires ferroélectriques non-volatiles, des progrès spectaculaires récents ont été faits (voir article de revue dans Science [1]). La stabilité des deux états électriques de ces matériaux combinée avec une technique de haute résolution que représente le microscope à force atomique (AFM) rend ces systèmes très attrayants. En envoyant des impulsions électriques sur la pointe métallique d'un AFM au-dessus d'une surface préparée, nous pouvons créer des rangées de domaines non-volatiles, adressables individuellement et complètement réversibles, avec des densités atteignant 40 Gbit/cm^2. Pour comparaison, l'Encyclopédie Universalis tient sur six CD de 700 Mo, alors qu'en utilisant les mémoires ferroélectriques, cette même Encyclopédie Universalis tiendrait sur la surface d'un carré de 9mm de côté.

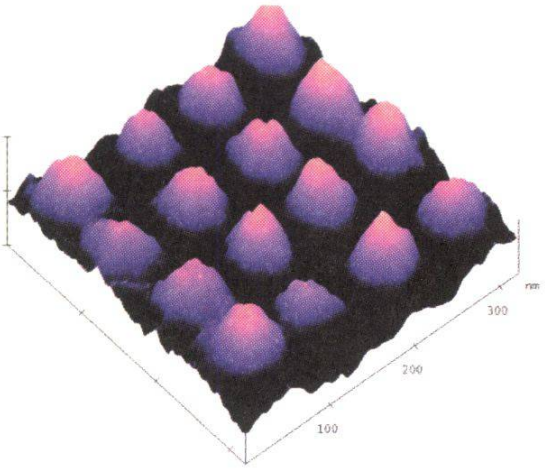

Figure 2 : Réseau écrit avec une densité de 18Gbit/cm^2.

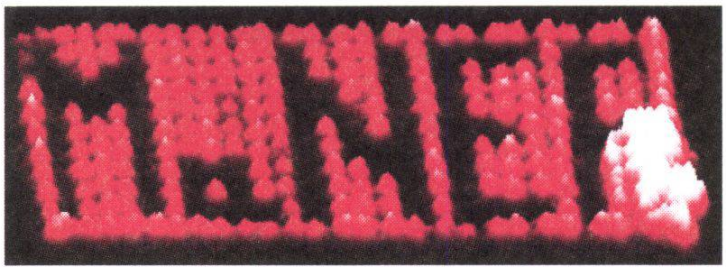

Figure 3 : Réseau écrit avec une densité d'environ 5 Gbit/cm^2 représentant le mot MaNEP, Pôle National de Recherche centré à Genève. On pourrait placer ce mot dix-sept fois dans le diamètre d'un cheveu.

Matériaux artificiels aux propriétés nouvelles

Dans ce domaine, nos recherches visent à créer artificiellement des composés aux propriétés inédites, en concoctant des "multicouches" faites de couches ultra-minces – quelques nanomètres d'épaisseur à peine – alternant ferroélectrique et isolant.

Une des grandes questions posées par la course à la miniaturisation électronique vaut pour les ferroélectriques aussi : jusqu'à quel point leur propriété continue-t-elle à exister à des échelles si minuscules ? Sur la base des connaissances actuelles, on pourrait s'attendre à ce qu'elle décroisse en fonction de la quantité de ferroélectrique présent dans le composé… jusqu'à disparaître complètement.

Or, un comportement inattendu a récemment été mis en lumière. Nos études montrent que des multicouches contenants des couches ferroélectriques (ici du titanate de plomb) de plus en plus fines ont bien commencé par montrer la décroissance attendue de la polarisation liée à la ferroélectricité… mais au lieu de disparaître, celle-ci est remontée en flèche pour les couches les plus minces ! Ce comportement inattendu du matériau démontre l'existence d'un nouveau phénomène que nous essayons de modéliser.

Ces résultats prouvent en outre que l'environnement dans lequel se trouve le ferroélectrique - c'est-à-dire de quoi sont faites les autres couches de la multicouche, soit dans ce cas du titanate de strontium - est d'une importance capitale.

Tout cela montre qu'à l'échelle nanométrique, la matière peut manifester des comportements nouveaux et très prometteurs, notamment pour l'électronique miniaturisée de demain. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication dans la revue internationale « Physical Review Letters » [2].

[2] *"Unusual Behavior of the Ferroelectric Polarization in $PbTiO_3/SrTiO_3$ Superlattices"*, M. DAWBER, C. LICHTENSTEIGER, M. CANTONI, M. VEITHEN, P. GHOSEZ, K. JOHNSTON, K. M. RABE and J.-M. TRISCONE, Physical Review Letters **95** (17) 177601 (2005)

Dans la direction des structures combinant matériaux ferroélectriques et supraconducteurs, les buts recherchés sont :

De réaliser des structures électroniques contrôlées par l'état de polarisation du ferroélectrique. Comme dans un transistor à effet de champ classique, l'idée est d'utiliser un champ électrique pour moduler les propriétés électroniques d'un supraconducteur (ou autre matériau à fortes corrélations électroniques). L'originalité ici est d'utiliser la polarisation non-volatile et réversible d'un ferroélectrique comme source de champ. Un des points fascinants est le fait que tous les matériaux à fortes corrélations sont très sensibles à de nombreux paramètres, entre autres, au nombre de porteurs (qui est modulé par le champ électrique). Comme indiqué sur la **Figure 4**, suivant le nombre de porteurs, ces matériaux peuvent être isolants, métalliques ou supraconducteurs. Un contrôle de ces propriétés par effet de champ ouvre des perspectives remarquables tant du point de vue fondamental que du point de vue appliqué.

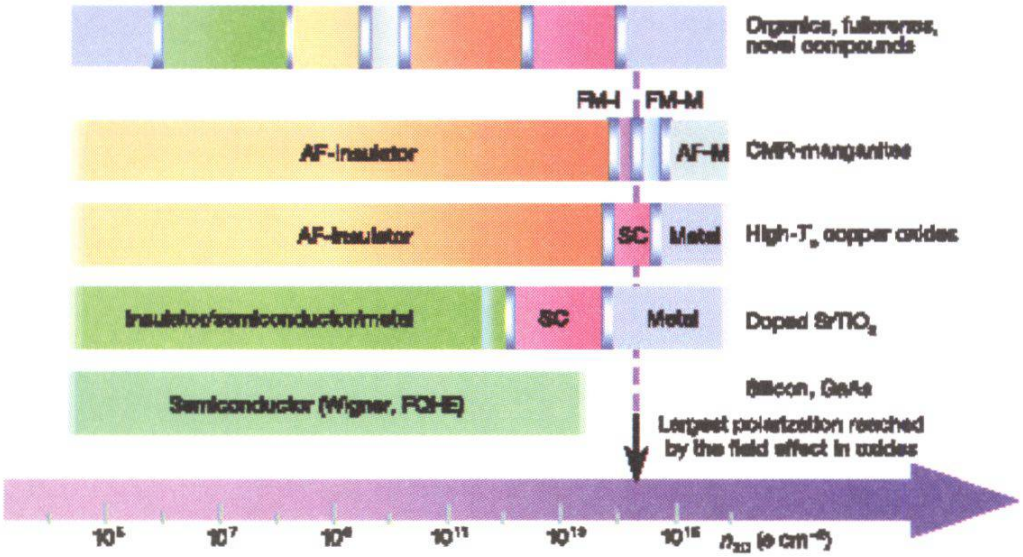

Figure 4 : Comportement de différents matériaux en fonction de leur densité de porteurs (à 2D). Comme on le voit, par exemple pour les oxydes supraconducteurs, le matériau peut-être isolant, métallique ou supraconducteur.

Les défis dans cette direction de recherche ont également fait l'objet d'une revue :

[3] "*Field effect in correlated oxides*", C.H. AHN, J.-M. TRISCONE, and J. MANNHART, Nature **424**, 1015 (2003).