

Síntesi i caracterització dels materials multiferroics BiFeO₃, La: BiFeO₃ i Sr: BiFeO₃ *Synthesis and characterization of multiferroic materials BiFeO₃, La: BiFeO₃ i Sr: BiFeO₃*

Xavier Vendrell* i Lourdes Mestres

Universitat de Barcelona. Facultat de Química. Departament de Química Inorgànica.

Resum. Recentment, ha crescut un notable interès pels materials multiferroics (o materials que presenten simultàniament propietats elèctriques i magnètiques), a causa de les seves múltiples aplicacions, sobretot en el camp de l'electrònica. Aquest article pretén donar a conèixer els materials multiferroics, tant des del punt de vista de la física fonamental com de la química de l'estat sòlid. Així mateix, es presentarà un dels materials multiferroics actualment més estudiats i s'exposaran els detalls de la seva síntesi i caracterització habituals en la química de l'estat sòlid.

Paraules clau: Multiferroic, reacció en estat sòlid, química suau, ferrita de bismut.

Abstract. Multiferroic materials, or materials that present both electric and magnetic ordering simultaneously, have attracted enormous attention recently due to their application in electronic devices. This paper aims to highlight such materials, as much for solid state chemistry considerations as for fundamental physics. At the same time, one of the most studied multiferroic materials will be presented together with the synthetic details and characterization techniques most commonly used in solid state chemistry.

Keywords: Multiferroic, solid state reaction, soft chemistry, bismuth ferrite.

Introducció

Un material multiferroic és aquell que presenta la coexistència de com a mínim dos dels tres ordres ferroics, és a dir, ferroelectricitat, ferromagnetisme i/o ferroelasticitat.¹ En els materials multiferroics, la interacció d'acoblament entre els diferents paràmetres pot produir nous efectes, com ara l'efecte magnetoelèctric, que es defineix, normalment, com l'acoblament entre els camps elèctric i magnètic de la matèria, de tal manera que l'aplicació d'un camp elèctric sobre el material provoca un canvi en la magnetització, o al contrari, l'aplicació d'un camp magnètic produeix una variació en la polarització del material.

El primer estudi sobre l'efecte magnetoelèctric va ser descrit l'any 1888, quan Röntgen va descobrir que un dielèctric en moviment sotmès a un camp elèctric es magnetitzava, mentre que si era sotmès a un camp magnètic, es polaritzava.^{2,3} Sis anys més tard, Pierre Curie va assenyalar la possibilitat d'una

certa relació entre la simetria cristal·lina i l'efecte magnetoelèctric sense la necessitat de moviment (efecte magnetoelèctric intrínsec).⁴

Cal destacar, però, que el terme *efecte magnetoelèctric* va ser definit per primera vegada a la tercera dècada del segle passat per Debye,⁵ però no fou fins al 1959 que Dzyalshinskii⁶ va estudiar experimentalment el comportament magnetoelèctric del sistema Cr₂O₃. Així, a partir d'aquest moment, es van iniciar molts esforços per trobar i sintetitzar compostos que poguessin tenir aquesta propietat. Concretament, es va observar aquesta propietat en més de vuitanta compostos diferents, entre ells, Ti₂O₃,⁷ GaFeO₃,⁸ algunes boracites,⁹ fosfats¹⁰ i algunes solucions sòlides, com PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O₃.¹¹

Actualment, l'estudi dels materials que presenten efecte magnetoelèctric és un dels camps més explotats, atès que les seves aplicacions a l'àrea de l'enginyeria electrònica són força prometedores, sobretot pel que fa a la manipulació i l'emmagatzematge de dades.

Materials susceptibles de presentar efecte magnetoelèctric

Existeixen fonamentalment dues maneres diferents per obtenir un material que presenti simultàniament un comporta-

Correspondència: Xavier Vendrell. Universitat de Barcelona. Facultat de Química.
Departament de Química Inorgànica
C. de Martí i Franquès, 1-11. 08028 Barcelona
Tel.: +34 934 021 225. Fax: +34 934 907 725
A. e.: xavier.vendrell@ub.edu

ment ferroelèctric i ferromagnètic i que, a més a més, hi hagi acoblament entre ambdues propietats.

Potser la manera més intuïtiva és la formació de *composites*, amb la qual una fase és ferroelèctrica i l'altra és ferromagnètica, de tal manera que l'acoblament es realitza de manera mecànica. Així, Van den Boomgaard i Van Suchtelen^{12,13} van sintetitzar per primera vegada un material que presentava efecte magnetoelèctric per combinació del compost ferroelèctric BaTiO₃ i el compost ferromagnètic CoFe₂O₄ en la composició de l'eutèctic (65:35) amb estructura laminar. Els *composites* es poden sintetitzar en *bulk* o bé en capa fina. Quan ho fan en capa fina, poden presentar dues geometries extremes:¹⁴

a) Multicapa, a partir de compostos ferroelèctrics d'una sola fase i de compostos ferromagnètics també d'una sola fase. Així, es desenvolupa un material que consisteix en capes alternades de fase ferroelèctrica amb fase ferromagnètica (figura 1).

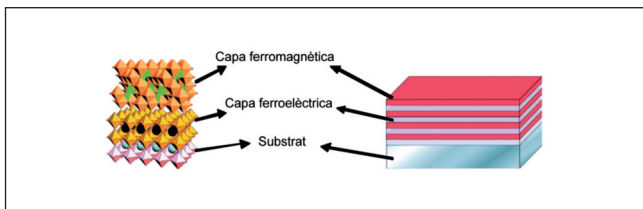


FIGURA 1. Esquema de material multiferroic multicapa.

b) Nanopilars, partint dels mateixos compostos que en el cas anterior. S'arriba a una heteroestructura que consisteix en nanopilars de fase ferromagnètica sostinguts sobre una matriu de fase ferroelèctrica (figura 2).

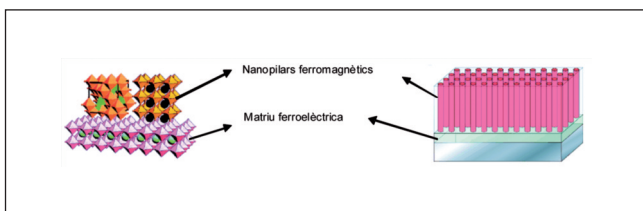


FIGURA 2. Esquema de material multiferroic formant nanopilars.

L'existència de les dues geometries extremes és conseqüència dels acoblaments en l'estructura entre les dues fases, a causa de la coordinació dels àtoms d'oxigen de la fase ferroelèctrica amb els de la fase ferromagnètica. El fet que es doni el multiferroic en una geometria o en l'altra serà en funció del caràcter de les diferents interaccions que tinguin lloc entre les dues fases.

Atès que emprant el mètode anterior cal sintetitzar dos compostos i aconseguir que hi hagi un acoblament mecànic entre ells, sorgeix la possibilitat de sintetitzar un únic compost que presenti simultàniament un comportament ferroelèctric i ferromagnètic. En aquest sentit, per tal de sintetitzar materials multiferroics, cal tenir en compte determinades limitacions. En primer lloc, la limitació estructural pot donar lloc, o no, tant a la ferroelectricitat com al ferromagnetisme. Per tant, el cristall haurà de pertànyer a algun dels grups puntuals que permetin alhora la polarització tant elèctrica com magnètica. Els materials que presenten una estructura de tipus perovskita (ABX₃) han estat els més estudiats dins d'aquest camp.

Així, doncs, s'ha observat que, per a una estructura de tipus perovskita, és necessari que un catió B presenti una configuració electrònica d^0 per tal que el material presenti la propietat ferroelèctrica. D'altra banda, per tal que existeixi una polarització d'espín magnètic, és necessari que el metall de transició de la perovskita posseeixi electrons desaparellats als orbitals d o f . Per tant, sembla que totes dues propietats siguin incompatibles. No obstant això, existeixen dos mecanismes diferents pels quals es poden donar aquestes dues propietats alhora en una mateixa fase.^{15,16}

En primer lloc, si es manté el metall de transició B amb una configuració electrònica d^0 , condició necessària perquè sigui ferroelèctric, i, a més a més, si s'introdueix un element lantànid que tingui els orbitals f parcialment ocupats en la posició A de la perovskita, es pot afavorir el ferromagnetisme del compost. En segon lloc, si es manté el catió B com l'element que proporciona la propietat magnètica del material, la ferroelectricitat es pot donar si en la posició A de la perovskita s'introdueix un element que presenti un parell d'electrons solitaris, ns^2 (parell inert). Aquests cations que presenten un parell d'electrons solitaris poden participar en la formació d'enllaços emprant orbitals híbrids sp (normalment, sp^2 o sp^3), però, en aquests sistemes, sovint no hi participen. Així, la particular orientació del parell d'electrons inert en els orbitals híbrids pot generar dipols locals que proporcionen el comportament ferroelèctric.¹ En aquest sentit, els cations Bi³⁺ i Pb²⁺ són dos exemples de cations que presenten aquesta característica i que, per tant, poden generar, en una estructura perovskita, la propietat ferroelèctrica. Així, doncs, existeixen alguns exemples de perovskites que presenten aquests elements i que són materials multiferroics, com ara el Pb(Fe,Nb)O₃ (PFN)¹¹, amb la presència de plom, i el BiMnO₃¹⁷ (BMO) i el BiFeO₃¹⁸ (BFO), amb bismut.

Atesa la toxicitat del plom i atès que la normativa europea de restricció de certes substàncies perilloses (2002/95/CE), o normativa RoHS (*restriction of hazardous substances*), restringeix l'ús de sis materials perillosos (entre ells, el plom) en la fabricació de diversos tipus d'equips elèctrics i electrònics, són molts els esforços per intentar sintetitzar materials lliures de plom que presentin efecte magnetoelectríic. Un bon candidat és el BFO.

El compost BiFeO₃ (BFO)

La perovskita de bismut i ferro, BiFeO₃ (BFO), ha suscitat tant interès pel fet que presenta unes bones propietats tant elèctriques com magnètiques a temperatura ambient, alhora que presenta una temperatura de Curie ferroelèctrica¹⁹ i una temperatura de Néel elevades.²⁰

Es pot definir l'estructura del BFO mitjançant una cel·la unità romboèdrica amb un paràmetre de cel·la $a = 3,96 \text{ \AA}$, un angle romboèdric $\alpha_{rh} = 0,6^\circ$ i una simetria $R3c$ (figura 3).

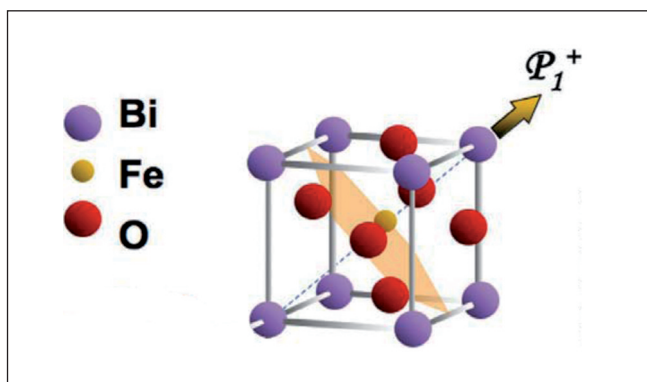


Figura 3. Cel·la unità de tipus romboèdric de la perovskita de BiFeO₃.

Així, es pot observar clarament com la propietat ferroelèctrica ve determinada pel llarg desplaçament dels ions de Bi respecte dels octaedres [FeO₆] en la direcció $\langle 111 \rangle$ del romboedre. Aquest desplaçament disminueix a mesura que augmenta la temperatura, de tal manera que presenta una $T_C = 769 \text{ }^\circ\text{C}$.²¹ D'altra banda, cal destacar que presenta un mínim local per a l'angle romboèdric α_{rh} , prop de la temperatura de Néel antiferromagnètica $T_N = 373 \text{ }^\circ\text{C}$,²² així com una rotació gradual dels octaedres [FeO₆] i un augment de l'angle Fe–O–Fe. Tanmateix, una de les distàncies Bi–Fe presenta també un màxim local prop de la T_N . Aquests fets donen com a resultat unes característiques força singulars, de tal manera que el BFO presenta un

ordenament antiferromagnètic de tipus G, en el qual els moments magnètics dels cations Fe³⁺ es troben alineats de forma ferromagnètica en un mateix pla, però s'ordenen antiferromagnèticament en els plans adjacents. Addicionalment, el BFO posseeix una estructura cíclica d'espín en el *bulk*.^{23,24}

Tal com s'ha pogut comprovar, les propietats magnètiques i elèctriques del BFO depenen directament de les posicions atòmiques dels elements que el formen. D'aquesta manera, sembla obvi de pensar que la introducció d'elements dopants pot fer variar lleugerament les propietats tant elèctriques com magnètiques. En aquest sentit, s'ha observat que al BFO dopat amb lantani es restringeix la formació d'una segona fase no ferroelèctrica, s'hi incrementa la magnetització i s'aconsegueix alliberar el dispositiu de fatiga per processos de commutació.²⁵

D'altra banda, les propietats multiferroiques del BFO són també atribuïdes a l'efecte de la grandària de l'ió.²⁶ Les substitucions a la posició A de la perovskita per ions de radi major (Bi³⁺ = 1,03 Å, NC = 6) i/o de diferent càrrega generen una major distorsió estructural i, per tant, una modificació en les propietats magnètiques i ferroelèctriques del material. Amb aquest propòsit s'han sintetitzat compostos de BFO dopats amb Ca,²⁷ Sr,²⁸ Ba²⁹ i Pb.³⁰

Mètodes de síntesi del BFO

Atès el gran interès científic que suscita aquest nou compost, en els últims anys s'ha publicat un gran nombre d'articles que fan referència a la síntesi del BFO. Tanmateix, la seva síntesi és força complexa i, en moltes ocasions, cal combinar diversos mètodes per obtenir un producte prou pur.

El mètode de síntesi per reacció en estat sòlid és potser un dels mètodes més emprats en la química de l'estat sòlid. Normalment, es parteix dels òxids o carbonats corresponents i s'hi apliquen tractaments tèrmics llargs a temperatures elevades. També és usual el fet de sinteritzar el producte per tal d'obtenir una major densitat del material i per millorar-ne les propietats. Això no obstant, les temperatures elevades i els temps llargs en la síntesi fan que aquest mètode sigui poc rendible econòmicament i mediambiental. És per aquest motiu que s'intenten reduir la despesa econòmica i la repercussió mediambiental mitjançant mètodes alternatius amb els quals es redueixi tant la temperatura com el temps de síntesi.

Aquests mètodes s'engloben en els anomenats *mètodes de química suau*, mitjançant els quals, en aquest cas, s'utilitzen com a reactius els nitrats de ferro(III) i bismut, i com a agent quelant, s'utilitzen àcid cítric, àcid tartàric, àcid màlic, àcid oxàlic, etc. El control exhaustiu del pH de la dissolució final és important, ja que, a pH per sobre de 3, s'observa la precipitació d'hidròxid de ferro(III) i s'impedeix la completa complexació dels cations.³¹ Finalment, s'obté un precursor polimèric amb el qual es realitza el tractament tèrmic en condicions de temps i temperatura més suaus que en el cas del mètode ceràmic. Amb aquest mètode s'obté, normalment, un producte amb una mida de partícula a escala nanomètrica.

Abans d'iniciar la síntesi de la perovskita de bismut i ferro, tant pel mètode de reacció en estat sòlid com pel mètode de química suau, cal estudiar el seu diagrama de fases, en el qual es representen els canvis de fase en funció de la temperatura i de la concentració (figura 4). Tal com es pot observar al diagrama de fases reportat per Palai *et al.*,³² el compost BiFeO_3 està representat només en una línia, fet que pot provocar l'aparició d'altres fases riques en ferro(III), com $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, o riques en bismut, com $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$. Així, és important tenir una especial precaució en fer la pesada i en homogeneïtzar els compostos de partida. En segon lloc, cal destacar que, a temperatures properes als 960°C , el compost de bismut i ferro descompon en forma d'òxid de ferro(III) i una fase líquida. D'altra banda, és important destacar que l'òxid de bismut és força volàtil i que presenta un punt de fusió relativament baix ($T_{fus} = 817^\circ\text{C}$), de manera que s'han d'evitar les temperatures massa elevades i els temps de síntesi llargs per tal d'evitar també la pèrdua d'aquest òxid durant el tractament tèrmic.

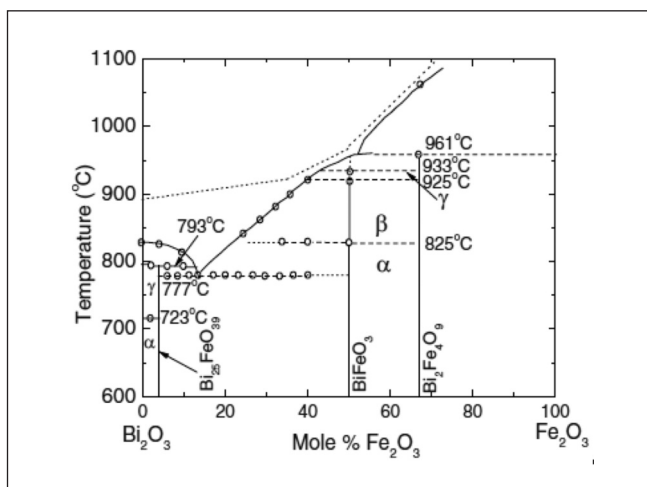


FIGURA 4. Diagrama de fases de Bi_2O_3 i Fe_2O_3 .

Finalment, cal fer notar que, en substituir el bismut per lan-tani o estronci per obtenir els compostos $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ i $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-x/2}$, respectivament, els diagrames de fases seran diferents als observats pel sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$, de tal manera que s'hauran d'optimitzar de nou les temperatures i els temps de síntesi.

Tècniques de caracterització

El seguiment de la síntesi d'aquests materials es va dur a terme mitjançant la difracció de raigs X (DRX), ja que és una de les tècniques més emprades en la caracterització de materials, atès que permet, d'una banda, identificar les fases cristal·lines presents a la mostra i, per tant, observar la presència o l'absència d'impureses a la mostra i, d'altra banda, analitzar les seves propietats estructurals sense destruir-la.

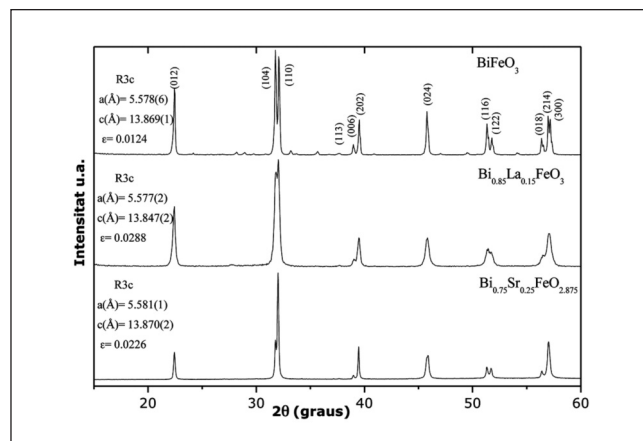


Figura 5. Diagrames de difracció de raigs X corresponents a les mostres BiFeO_3 , $\text{Bi}_{0,85}\text{La}_{0,15}\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{FeO}_{2,875}$.

Després d'optimitzar les condicions de síntesi tant per reacció en estat sòlid com per química suau, s'analitzaren els diagrames de difracció obtinguts per a cada composició i mètode de síntesi emprat. D'aquesta manera, es van poder determinar les propietats estructurals de cada material. A tall d'exemple, a la figura 5 es mostren els diagrames de difracció de raigs X de les mostres BiFeO_3 , $\text{Bi}_{0,85}\text{La}_{0,15}\text{FeO}_3$ i $\text{Bi}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{FeO}_{2,875}$, així com els índexs de Miller, la simetria i els paràmetres de cel·la.

Una altra tècnica important en la caracterització dels materials és la microscòpia electrònica de rastreig (MER), ja que és una tècnica força versàtil que permet estudiar la textura, la topografia i la morfologia.

La figura 6 mostra imatges de les diferents mostres en les quals es pot apreciar clarament com tant la composició com el mètode de síntesi emprat modifiquen notablement les característiques morfològiques i estructurals d'aquests materials. Les mostres de BiFeO_3 i $\text{Bi}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{FeO}_{2,875}$ sintetitzades mitjançant el mètode de química suau presenten grans rectangulars i ben definits, tot i que, en el cas del BiFeO_3 , la mida del gra és significativament major. En canvi, en el cas del $\text{Bi}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{FeO}_{2,875}$ sintetitzat mitjançant el mètode de reacció en estat sòlid, hi ha aglomerats de grans arrodonits i poc definits.

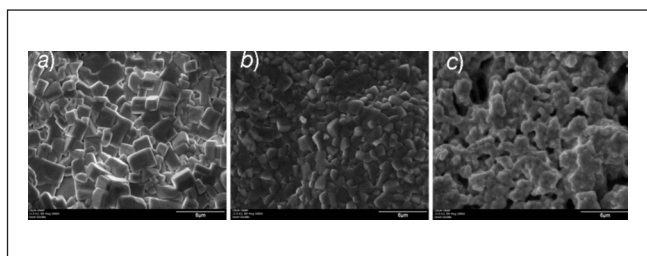


FIGURA 6. Imatges MER de les mostres: a) BiFeO_3 , b) $\text{Bi}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{FeO}_{2,875}$ obtinguts mitjançant mètode de química suau i c) $\text{Bi}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{FeO}_{2,875}$ sintetitzat per reacció en estat sòlid.

Conclusió

Tal com s'ha pogut constatar, existeix un notable interès en els materials multiferroics no només pel que fa a les seves aplicacions en dispositius per a l'emmagatzematge d'informació, sinó també des del punt de vista de la física fonamental. En aquests materials, el tipus d'estructura, la posició dels àtoms que conformen la cel·la unitat i el seu caràcter són clau per donar lloc a noves propietats, com l'efecte magnetoelèctric.

La síntesi del BiFeO_3 és força complexa, ja que evitar la presència de fases secundàries esdevé un repte difícil a assolir. Això no obstant, s'ha aconseguit obtenir una única fase tant per al BiFeO_3 com per als seus derivats mitjançant dos mètodes de síntesi diferents emprant temperatures de síntesi no superiors als $850\text{ }^\circ\text{C}$ i temps curts.

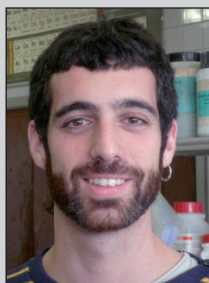
Mitjançant les tècniques de caracterització habituals en la química de l'estat sòlid i de materials, s'ha pogut comprovar com tant la composició com el mètode emprat en la síntesi modifiquen la morfologia del material i, per tant, cal esperar una resposta elèctrica diferent en cada cas.

Així, doncs, s'ha aconseguit obtenir materials que presenten les característiques tant estructurals com de composició adients com per presentar l'efecte magnetoelèctric i ser, per tant, materials multiferroics. Finalment, cal destacar la importància de la química de l'estat sòlid en l'actualitat, ja que nombrosos dispositius electrònics que s'empen actualment, com les memòries RAM o les bateries de liti, són el fruit d'una severa i constant investigació en aquesta àrea de la química.

Referències

- [1] Spaldin, N. A.; Pickett, W. E. *Journal of Solid State Chemistry* **2003**, *176*, 615.
- [2] Röntgen, W. C. *Ann. Phys. Chem.* **1888**, *35*, 264.
- [3] Wilson, H. A. *Phil. Trans. R. Soc. A* **1905**, *204*, 129.
- [4] Curie, P. J. *Physique* **1894**, *3*, 393.
- [5] Debye, P. Z. *Phys.* **1926**, *36*, 300.
- [6] Dzyaloshinskii, I. E. *Sov. Phys.-JETP* **1959**, *10*, 628.
- [7] Al'shin, B. I.; Astrov, D. N. *Sov. Phys.-JETP* **1963**, *17*, 809.
- [8] Rado, G. T. *Phys. Rev. Lett.* **1964**, *13*, 335.
- [9] Ascher, E.; Rieder, H.; Schmid, H.; Stössel, H. *J. Appl. Phys.* **1966**, *37*, 1404.
- [10] Santoro, R. P.; Segal, D. J.; Newnham, R. E. *J. Phys. Chem. Solids* **1966**, *27*, 1192.
- [11] Watanabe, T.; Kohn, K. *Phase Trans.* **1989**, *15*, 57.
- [12] Boomgaard, J. V. D.; Born, R. A. J. *J. Mater. Sci.* **1978**, *13*, 1538.
- [13] Boomgaard, J. V. D.; Vanrun, A. M. J. G.; Suchtelen, J. V. *Ferroelectrics* **1976**, *10*, 295.
- [14] Zheng, H.; Wang, J.; Lofland, S. E.; Ma, Z.; Mohaddes-Ardabili, L.; Zhao, T.; Salamanca-Riba, L.; Shinde, S. R.; Ogale, S. B.; Bai, F.; Viehland, D.; Jia, Y.; Schlom, D. G.; Wuttig, M.; Roytburd, A.; Ramesh, R. *Science* **2004**, *303*, 661.
- [15] Khomskii, D. I. *Journal of Magn. & Magnetic Materials* **2006**, *306*, 1.
- [16] Hill, N. A.; Seshadri, R. *Chem. Matter.* **2001**, *13*, 2892.
- [17] Kadomtseva, A. M.; Zvezdin, A. K.; Popov, Yu. F.; Pyatakov, A. P.; Vorob'ev, G. P. *JETP Lett.* **2004**, *79*, 571.
- [18] Chu, Y. H.; Martin, L. W.; Zhan, Q.; Yang, P. L.; Cruz, M. P.; Lee, K.; Barry, M.; Yang, S. Y.; Ramesh, R. *Ferroelectrics*, **2007**, *354*, 167.
- [19] Catalan, G.; Scott, J. F. *Adv. Mater.* **2009**, *21*, 2463.
- [20] Smolenskii, G. A.; Isupov, V. A.; Krainik, N. N.; Agranovskaya, A. I. *Sov. Phys. Solid State* **1961**, *25*, 1333.

- [21] Fischer, P.; Polomska, M.; Sosnowska, I.; Szymanski, M. *J. Phys. C: Solid State Phys.* **1980**, *13*, 1931.
- [22] Selbach, S. M.; Einarsrud, M.-A.; Grande, T. *Chem. Mater.* **2009**, *21*, 169.
- [23] Valant, M.; Axelsson, A.-K.; Alford, N. *Chem. Mater.* **2007**, *19*, 5431.
- [24] Bea, H.; Bibes, M.; Fusil, S.; Bouzouane, K.; Jacquet, E.; Rode, K.; Bencok, P.; Barthelemy, A. *Phys. Rev. B.* **2006**, *74*, 20101.
- [25] Ostos, C.; Raymond, O.; Suárez-Almodóvar, N.; Bueno-Baqués, D.; Mestres, L.; Siqueiros, J. M. *J. Appl. Phys.* **2011**, *110*, 024114.
- [26] Reyes, A.; Vega, C.; Fuentes, M. E.; Fuentes, L. *J. Eur. Ceram. Soc.* **2007**, *27*, 3709
- [27] Murashov, V. A.; Rakov, D. N.; Ionov, V. M.; Dubenko, I. S.; Titov, Y. V.; Gorelik, V. S. *Ferroelectrics* **1994**, *162*, 359.
- [28] Popov Yu, U.; Kadomtseva, A. M.; Vorob'ev, G. P.; Zvezdin, A. K. *Ferroelectrics* **1994**, *162*, 483.
- [29] Sosnowska, I.; Peterlin-Neumaier, T.; Steichele, E. *J. Phys. C* **1982**, *15*, 4835.
- [30] Petrov, P. K.; Palkar, V. R.; Tagantsev, A. K.; Chien, H.-I.; Prashanthi, K.; Axelsson, A.-K.; Bhattacharya, S.; Alford, N. *J. Mater. Res.* **2007**, *22*, 2179.
- [31] Mishra, R. K.; Pradhan, D. K.; Choudhary, R. N. P.; Banerjee, A. *J. Phys. Condens. Matter.* **2008**, *20*, 45218.
- [32] Kothari, D.; Reddy, V. R.; Gupta, A.; Sathe, V.; Banerjee, A.; Gupta, S. M.; Awasthi, A. M. *Appl. Phys. Lett.* **2007**, *91*, 202505.
- [33] Li, M.; Ning, M.; Ma, Y.; Wu, Q.; Ong, C. K. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2007**, *40*, 1603.
- [34] Khomchenko, V. A.; Kiselev, D. A.; Selezneva, E. K.; Vieira, J. M.; Lopes, A. M. L.; Pogorelov, Y. G.; Araujo, J. P.; Kholkin, A. L. *Mat. Lett.* **2008**, *62*, 1927.
- [35] Khomchenko, V. A.; Kiselev, D. A.; Vieira, J. M.; Jian, L.; Kholkin, A. L.; Lopes, A. M. L.; Pogorelov, Y. G.; Araujo, J. P.; Maglione, M. *J. Appl. Phys.* **2008**, *103*, 024105.
- [36] Selbach, S. M.; Einarsrud, M.-A.; Tybell, T.; Grande, T. *J. Am. Ceram. Soc.* **2007**, *90*, 3430.
- [37] Palai, R.; Katiyar, R. S.; Schmid, H.; Tissot, P.; Clark, S. J.; Robertson, J.; Redfern, S. A. T.; Catalan, G.; Scott, J. F. *Physical Review B* **2008**, *77*, 014110.



X. Vendrell



L. Mestres

Xavier Vendrell és llicenciat en química per la Universitat de Barcelona. Forma part del grup Química de l'Estat Sòlid i del Departament de Química Inorgànica de la Universitat de Barcelona, on actualment és professor ajudant i on està realitzant una tesi doctoral en ciència i tecnologia dels materials.

Lourdes Mestres és doctora en química per la Universitat de Barcelona i professora titular d'aquesta mateixa Universitat al Departament de Química Inorgànica. La seva recerca dins el grup Química de l'Estat Sòlid se centra en la síntesi de nous materials multifuncionals, la preparació de pel·lícules primes i l'estudi de les seves propietats per avaluar-ne l'aplicació en dispositius electrònics.