

Una perspectiva sobre óxidos con alta correlación electrónica, sus propiedades, mecanismos de control y aplicaciones

José Pablo Sosa Lizama

Universidad de Stuttgart, Alemania

Fecha de recepción: 3 de julio de 2013 - Fecha de aceptación: 15 de enero de 2024

Resumen

En sistemas como los óxidos de metales de transición, la competición de múltiples escalas de energía similares produce a una paleta riquísima de propiedades como ferromagnetismo, superconductividad y magnetorresistencia, entre otras. El control de estas fases da lugar a múltiples transiciones entre estos estados que, usadas hábilmente, permiten ingeniar dispositivos como memorias, transductores y transistores. Más aún, el empleo de técnicas de deposición de material para el crecimiento epitaxial y la heteroestructuración amplían las posibilidades de fenómenos novedosos más complejos, por ejemplo, ofreciendo acceso a efectos interfaciales imposibles de replicar en el bulto como consecuencia de la ruptura en la simetría traslacional. En este artículo mencionaremos inicialmente algunas de las características de los sistemas con alta correlación electrónica, y en particular de los óxidos de metales de transición, brindando una introducción cualitativa a la física microscópica dominante en ellos y algunas de sus transiciones de fase. Después se discuten algunos elementos del crecimiento epitaxial de materiales, y dos de los efectos más importantes que pueden ocurrir en él: transferencia de carga y reconstrucción. Finalmente, discutimos un par de perspectivas de aplicación exploradas con heteroestructuras.

Palabras clave: correlación electrónica, óxidos de metales de transición, heteroestructuras, interfaces, fenómenos interfaciales.

A perspective on oxides with strong electronic correlations, their properties, control mechanisms and potential applications

Abstract

In systems as transition-metal oxides, the competition between multiple energy scales of comparable magnitude produces a very rich palette of properties as ferromagnetism, superconductivity and magnetoresistance, among others. Control of such phases gives rise to multiple transitions between those states which, when skillfully employed, allows to engineer devices as memories, transducers and transistors. Moreover, the employment of material deposition techniques for epitaxial growth and heterostructuring further extend the possibilities of novel complex phenomena, offering e.g. access to interfacial effects that are non-replicable in the bulk as a consequence of translational symmetry-breaking. In this article, we will initially mention

*jpablo.sosa13@gmail.com

some of the characteristics of systems with strong electronic correlations, and particularly those of transition metal-oxides, giving a qualitative introduction to the dominating microscopic physics and some of their phase transitions. Later are discussed some elements from the epitaxial growth of materials, and two of the most important effects taking place in it: charge transfer and reconstruction. Finally, we will discuss a couple of application perspectives currently explored for heterostructures.

Keywords: electronic correlation, transition metal-oxides, heterostructures, interfaces, interfacial phenomena.

Introducción

Dentro de la física del estado sólido se distingue una vasta cantidad de compuestos con propiedades electrónicas que rompen con las predicciones semiclásicas y de la teoría de bandas del primer tercio del siglo XX: aquellos etiquetados como *altamente correlacionados*. Su descripción no puede ser hecha en términos de electrones no-interactuantes, requiriendo un tratamiento puramente cuántico; este es el caso particular de la correlación coulombica y el intercambio electrónico, este segundo consecuencia de la naturaleza fermiónica de los electrones. Lo más característico es que en estos sistemas no hay una única interacción dominante, capaz de explicar la cantidad de fases que ellos exhiben. Por el contrario, prevalece la competición entre múltiples grados de libertad –red, carga, orbital y espín– con escalas de energía similares, cuya delicada jerarquía y relaciones determina el estado base de un material bajo ciertas condiciones, y da lugar a complejas transiciones de fase. En este sentido, el comportamiento de un sistema con electrones altamente correlacionados es resultado de las complejas interacciones entre sus partes, hablándose de él como *emergente* (Dagotto, 2005). Estos diferentes grados de libertad mencionados y los elementos fenomenológicos que los relacionan son ilustrados en la Figura 1.

Óxidos de metales de transición

Un subconjunto de los sistemas con alta correlación electrónica son los óxidos de metales de transición (TMOs, del inglés

transition-metal oxides), que abarcan una variedad de complejos con iones de metales de transición (M) con átomos de oxígeno (O) como ligantes. En ellos, puesto que los electrones $M s$ son transferidos a los iones O altamente electronegativos, la física está dominada por los orbitales $M d$: transporte electrónico, magnetismo, respuesta óptica, conductividad térmica y superconductividad. Vale la pena recalcar que los orbitales tipo d se distinguen ampliamente de los tipos s y p por tener una densidad electrónica mucho más localizada espacialmente, que, en conjunción con las altas coordinaciones características de TMOs y la direccionalidad de los enlaces $M d - O p$, hace de las interacciones coulombicas una componente indispensable para la comprensión de los sistemas en cuestión. Esto se traduce no solamente en un importante coste energético de una doble ocupación orbital, sino también en efectos mayúsculos del campo cristalino: las bandas asociadas a los niveles $M d$ pierden la degeneración del átomo aislado, formando jerarquías de energía en función de la coordinación del ion M y el tipo de enlace $M d - O p$ (Zaanen et al., 1985). Por otra parte, distintos llenados de los niveles $M d$ y estados de oxidación posibles para una misma especie M tienen el efecto de modular la dominancia de las interacciones electrón-electrón frente al tunelamiento entre sitios de la red, dando lugar a estados base tan dispares como aislantes y metálicos, con y sin ordenamiento magnético (Imada et al., 1998).

Del lado del diseño de materiales y heteroestructuras, los TMOs tienen como ventaja su flexibilidad para combinarse: por una parte, el carácter altamente electronegativo del O y su carga iónica le permite formar una amplia variedad de compuestos estables con múltiples estructuras en condiciones prácticas, y por otra, el enlace $Md - Op$ favorece

coordinaciones tetraédricas y octaédricas que pueden ser distorsionadas empleando distintos cationes, dopajes y presencia de oxígeno para dar lugares a distintas propiedades (Coll et al., 2019). Este es el caso de los niquelatos de tierras raras (Catalano et al., 2018), estructuras de perovskita altamente deformadas en función del catión elegido, con un rico diagrama de fases electrónicas y magnéticas.

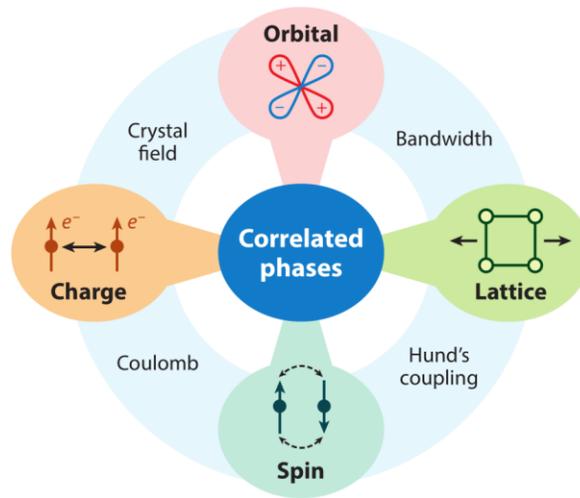


Figura 1. Esquema con los diferentes grados de libertad electrónicos (orbital, carga, espín) y estructural fundamentales en materiales con alta correlación electrónica. Asimismo, las relaciones entre aquellos dan lugar a la complejidad característica de estos sistemas. Tomada de (Ngai et al., 2014).

De la correlación electrónica ha sido descubierta una plétora de fenómenos, a decir: transiciones metal-aislante, complejos órdenes magnéticos y de carga, superconductividad no-convencional, multiferroicidad, magnetorresistencia colosal, entre otras. Dos ejemplos icónicos de este tipo de materiales son los cupratos y los manganatos, donde superconductividad de alta temperatura crítica y magnetorresistencia colosal surgen, respectivamente (Ngai et al., 2014). Obviando el interés en la física “exótica” de estos sistemas, un sentido más práctico abre la puerta a aplicaciones completamente nuevas en la computación y tecnologías de la información, tecnología de sensores, transformación y

almacenamiento de energía, entre otras (Cava et al., 2021).

Mecanismos de control

Las relaciones entre los distintos grados de libertad de los TMOs pueden ser modulados por campos externos, e.g. de presión, de temperatura, electromagnéticos, así como por heteroestructuración y dopaje químico. Considerando adicionalmente las escalas de energía compitiendo, estas técnicas pueden inducir nuevos estados base o estados metaestables de una enorme variedad (Hwang et al., 2012; Tokura et al., 2017). De estas última podemos mencionar:

- Presión. Como perturbación estática opera en condiciones de equilibrio térmico, y puede ser de tipo hidrostático (utilizando celdas de yunque de diamante) o axial (por ejemplo, con estructuras piezoeléctricas). Su efecto a nivel microscópico es el de modificar la superposición de los orbitales atómicos del sólido.
- Campos magnéticos altos. Inducen una reorientación de los momentos magnéticos en el caso de materiales con ordenamiento magnético, mientras que en sistemas con bandas anchas se forman órbitas de ciclotrón. Sirven para explorar transiciones magnéticas, así como para romper ciertos estados, e.g. el superconductor. Están en el rango de 10 – 100 T.
- Heteroestructuración. Sistemas artificiales cuasi-bidimensionales pueden ser creados por técnicas de deposición epitaxiales capa por capa. Mediante la generación de superredes pueden inducirse brechas de energía y efectos interfaciales como superconductividad y acoplamiento magnetoeléctrico (discutido más adelante). En cualquier caso, esta aproximación ofrece la creación de estados novedosos no presentes en el bulto.
- Campos eléctricos altos. Empleando láseres pulsados¹, generan efectos no-lineales y transiciones de fase. Este conjunto de técnicas conforma la hoy llamada *espectroscopía ultrarrápida*, que estudia la dinámica de fenómenos colectivos, en la escala temporal de los procesos electrónicos y atómicos (Yang et al., 2011; Zhang & Averitt, 2014).

En conexión con lo anterior, pueden mencionarse dos casos particulares de fenómenos colectivos que han cobrado una enorme relevancia en las últimas décadas por

el interés científico en ellos, así como sus mecanismos de control y potenciales aplicaciones: la emergencia de una transición metal-aislante y de la magnetoelectricidad.

Transición de Mott

Una transición metal-aislante puede tener en principio múltiples orígenes, e.g. cierre de la brecha de energía, desorden o distorsión de la red cristalina, pero uno originado en interacciones electrón-electrón recibe generalmente el nombre de *transición de Mott*,

y es la que concierne a los sistemas con alta

Figura 2 Figura 1. La primera (BC-MIT) correlación electrónica. De estas pueden involucra una variación relativa entre la energía de interacción electrón-electrón U y la probabilidad de salto electrónico interatómico t , mientras que la segunda (FC-MIT), se basa Hubbard (Imada et al., 1998), mostradas en el en la modificación del número de electrones por átomo de la red n . Las estructuras de diagrama de la perovskita AMO_3 son sistemas que reflejan claramente este diagrama de fases (Catalano et al., 2018). En ellas, el parámetro t es modulado por medio del cambio en el ángulo $M - O - M$, inducido por la variación en el radio iónico del catión A . Por otra parte, el parámetro n es modificado a partir del dopaje con iones A heterovalentes. Sobre esta misma línea, un caso paradigmático es el de los cupratos (Keimer et al., 2015): contienen planos CuO_2 que bajo dopaje con electrones y huecos forman un riquísimo diagrama de fases, incluyendo una región superconductora no-convencional (esto es, no explicada a partir del acoplamiento electrón-fonón).

¹ Con energías desde los THz hasta rayos X y duraciones menores de subpicosegundos ($< 10^{-12}$ s) para la

generación de campos eléctricos altos ($\sim 10^6 - 10^7$ MV/cm⁻¹) (Basov et al., 2011).

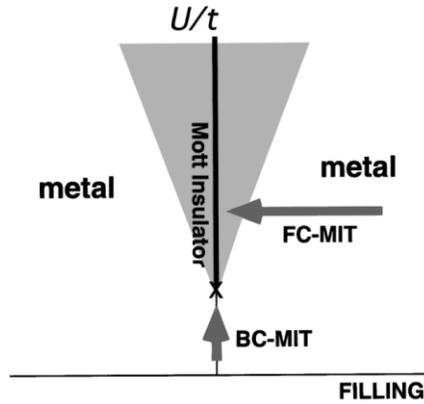


Figura 2. Diagrama de fase de la transición metal-aislante en el modelo de Hubbard. La transición puede inducirse mediante dos acercamientos: variando el parámetro de salto U/t (BC-MIT) o el número de electrones por sitio n (FC-MIT). Tomado de (Imada et al., 1998).

Magnetolectricidad

Por otra parte, el caso de la magnetolectricidad es muy distinto (Eerenstein et al., 2006): se refiere a la polarización eléctrica (magnética) de un material en presencia de un campo magnético (eléctrico). Esta se da en sistemas con susceptibilidades eléctrica y magnética finitas, y particularmente en los denominados *multiferroicos*, donde órdenes ferroeléctrico (desplazamientos atómicos dentro de la celda unitaria que remueven su simetría de inversión) y ferromagnético (causado por el efecto de intercambio electrónico) coexisten. En el terreno de las aplicaciones, las susceptibilidades de estos sistemas son demasiado débiles como para ser de utilidad, por lo que distintas estrategias para incrementar la intensidad de sus respuestas en al menos dos órdenes de magnitud han sido estudiadas (Tokura et al., 2017). Un acercamiento a esta cuestión se plantea mediante el *efecto magnetoeléctrico dinámico*,

donde los efectos de polarización son amplificados por medio de resonancia magnética o pulsos de luz de THz ultracortos (Bossini et al., 2023; Disa et al., 2020). Otra manera de aproximarse a esta cuestión es empleando la respuesta lineal de sistemas con un fuerte acoplamiento magnetización-polarización (mediado por el acoplamiento espín-órbita), como es el caso de algunas perovskitas de TMOs (Kimura et al., 2003; Tokura et al., 2014) y cristales donde la ferroelectricidad ocurre como consecuencia del orden magnético. Algunos sistemas de este último tipo son manganatos con una estequiometría como $(A_xB_{1-x})MnO_3$ y que exhiben *magnetoresistencia colosal*, donde cambios de la resistencia en múltiples órdenes de magnitud ocurren a partir de transiciones metal-aislante de primer orden inducidas por un campo electromagnético externo, acompañadas de otras transiciones metamagnética y estructural. Ejemplos de esto pueden verse en la Figura 3.

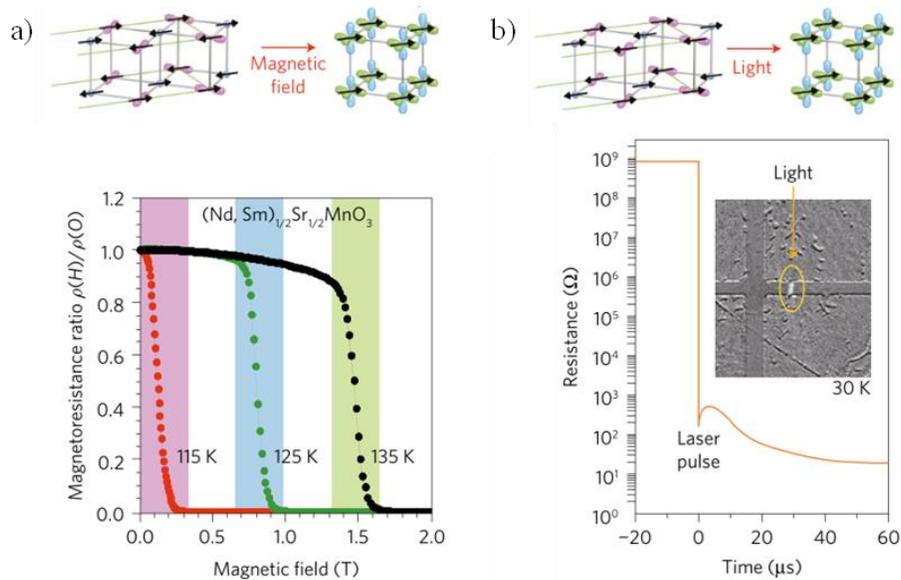


Figura 3. Perovskitas de magnesio que exhiben magnetorresistencia colosal: en ambos casos se representa un rompimiento de los órdenes magnético y de carga en a) $(\text{Nd, Sm})_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ y b) $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ como consecuencia de la aplicación de un campo magnético y eléctrico, respectivamente, que lleva de un sistema con orden magnético y aislante a un ferromagneto metálico. En el primer caso la transición ocurre a distintas temperaturas bajo distintos campos magnéticos. En el segundo, la transición ocurre en el tiempo, tras la aplicación de un campo eléctrico. Tomado de (Tokura et al., 2017).

Heteroestructuración

Las posibilidades de síntesis de materiales exceden los métodos convencionales de polvos y cristales, que empleando los diagramas de fase de los precursores y manipulando las condiciones de presión/temperatura/etc. permiten la formación de estructuras nuevas. Estructuras más complejas pueden ser obtenidas mediante técnicas de deposición capa por capa que reciben el calificativo de *epitaxiales*. Ellas consisten en el crecimiento de un material con sus capas atómicas en una orientación cristalina definida con respecto de una capa inicial, depositada sobre un cristal denominado *sustrato*, que impone su estructura sobre el material sobre él depuesto. Cuando el crecimiento de un material se hace sobre un sustrato del mismo (de distinto) material, se dice que es *homoepitaxial* (*heteroepitaxial*).

La posibilidad fundamental ofrecida por las técnicas de deposición epitaxial es la *estabilización epitaxial* (Ramesh & Schlom, 2019): fases termodinámicamente metaestables de un cristal pueden ser logradas mediante el crecimiento heteroepitaxial sobre un sustrato adecuado. Esto es, habiendo una fase de equilibrio bajo ciertas condiciones termodinámicas, otra con estructura cristalina distinta puede ser lograda cuando el crecimiento ocurre sobre un sustrato isoestructural a la fase deseada, siempre que el parámetro de red sea adecuado. Más aún, avances en los métodos de deposición epitaxial han generado la ruta de creación para un amplio rango de estructuras novedosas imposibles de obtener por otros métodos. Particularmente, el trabajo en *deposición por láser pulsado* (PLD) y *epitaxia de haces moleculares* (MBE) ha posibilitado la

creación de monocapas atómicas (Cui et al., 2020; King et al., 2014), heteroestructuras (Iannaccone et al., 2018) y superredes (Gong et al., 2022; Ramesh & Schlom, 2019) de TMOs con altísima precisión.

En estos sistemas artificiales son de gran interés la física nueva, así como la flexibilidad para afinar sus propiedades. Particularmente, en las interfaces entre materiales distintos ocurre un rompimiento de la simetría traslacional que tiene efectos notables: la transferencia de carga y la reconstrucción pueden generar fases intermedias con propiedades distintivas, incluso al nivel de una monocapa, mientras que el confinamiento espacial de los electrones potencia las interacciones entre ellos (Hwang et al., 2012). Así, sistemas como superredes superconductoras de cupratos (Samal et al., 2023) han sido logrados.

Transferencia de carga

La transferencia de carga es en muchos sistemas el factor primario de sus peculiaridades, teniendo su origen en la necesidad de preservar en equilibrio el potencial químico de dos materiales puestos en contacto. Esto lleva a distintos escenarios dependiendo del tipo de juntura en un material: apantallamiento interfacial para juntas metal-metal, creación de zonas agotadas de carga en juntas metal-semiconductor y doblamiento de bandas en juntas semiconductor-semiconductor. Escenarios más complejos de transferencia de carga “virtual” son también posibles, siendo este el caso de la interacción de superintercambio entre iones M mediada por

un ion ligante O localizado entre ellos (Kanamori, 1959), que determina en buena medida el magnetismo interfacial visto en heteroestructuras y superredes de TMOs (Jilili et al., 2023; Nanda & Satpathy, 2008).

Reconstrucción interfacial

Otra cuestión notable es el carácter iónico de muchos de los sistemas de TMOs, en cuyo caso las interfaces podrían presentar una acumulación de potencial electrostático, con un gran coste energético asociado que debe ser aliviado por algún mecanismo. Por ejemplo, tomando como referente a las perovskitas LaAlO_3 y SrTiO_3 apiladas a lo largo de la dirección (001), una interfaz como $\text{AlO}_2/\text{LaO}/\text{TiO}_2$ favorece la transferencia de carga, mientras que una de como $\text{AlO}_2/\text{SrO}/\text{TiO}_2$ favorece la reconstrucción mediante la formación de vacancias de oxígeno (Nakagawa et al., 2006). La ventaja de los metales de transición es que muchos de ellos son polivalentes, de manera que escenarios de transferencia de carga pueden diseñarse, sin una importante recombinación en las interfaces. Siguiendo con la misma referencia, en la interfaz $\text{LaAlO}_3 - \text{SrTiO}_3$ de estos materiales dieléctricos han sido generados un gas bidimensional de electrones (Ohtomo & Hwang, 2004) y monocapas superconductoras (Reyren et al., 2007), con posibilidad de control electrostático. Similarmente, el dopaje de huecos necesario para la fase superconductora en cupratos ha sido realizado a partir de la transferencia de carga entre CaCuO_2 y SrTiO_3 (Di Castro et al., 2012, 2015).

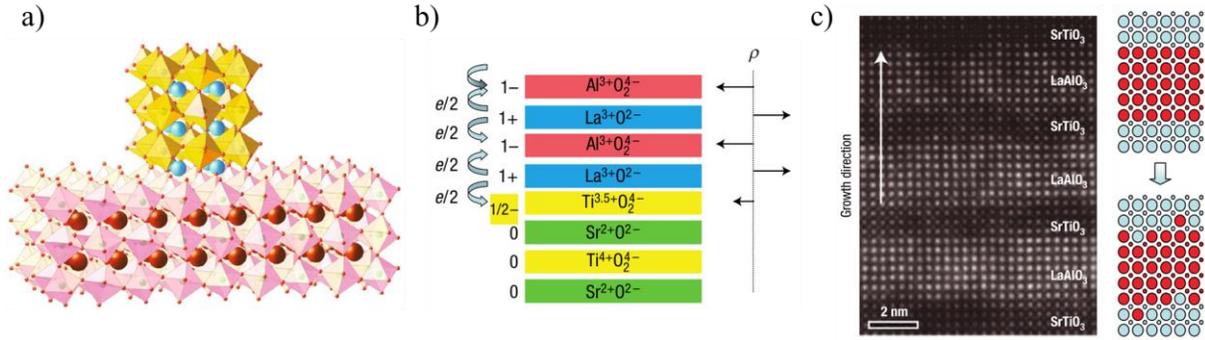


Figura 4. a) Estabilización epitaxial de fases nuevas. b) Escenario de transferencia de carga de medio electrón a través de la interfaz AlO₂/LaO/TiO₂ entre LaAlO₃ y SrTiO₃. c) Imagen de microscopía de transmisión de electrones de una superred (LaAlO₃)₃/(SrTiO₃)₃, mostrando un aumento de la rugosidad interfacial en la dirección del crecimiento debido a la difusión de cationes como parte de la reconstrucción interfacial. Figura a) tomada de (Ramesh & Schlom, 2019), b) y c) de (Nakagawa et al., 2006).

Aplicaciones

En el aspecto tecnológico son prometedores, por un lado, la diversidad de fenómenos colectivos y fases presentes en diversos TMOs y, por el otro, la posibilidad de combinar múltiples materiales de este tipo en heteroestructuras. Su relevancia se intensifica ahora, al final de la era tecnológica dominada por el silicio, con rápidos avances en la física de la materia condensada y de las plataformas de estado sólido. En este sentido, la brecha se abre para potenciales aplicaciones en electrónica de la tabla periódica completa, más allá de los semiconductores convencionales.

Memoria resistiva de acceso aleatorio (ReRAM)

Una primera aplicación por mencionar es en la creación de memorias resistivas de acceso aleatorio (ReRAMs), basadas en la conmutación de la resistencia de un material bajo la acción de un campo eléctrico suficientemente fuerte (Coll et al., 2019). Estos dispositivos consisten en una celda formada por una capa de TMO intercalada entre dos electrodos metálicos, cuya resistencia conmuta entre dos estados “bajo” y “alto” (que pueden ser mapeados a los bits “0” y “1”) a partir de la

aplicación de un voltaje siguiendo un ciclo histerético. Dichos estados pueden ser fácilmente leídos a partir de la aplicación de un voltaje de prueba, mucho menor que el de conmutación. Un diagrama de la celda y de la relación corriente-voltaje se muestra en la Figura 5. El principio de funcionamiento de estos dispositivos es el de una transición metal-aislante generada a partir de la aplicación de un campo eléctrico. Por las estructuras de las celdas, la aplicación de un campo eléctrico mueve cargas a través de las interfaces metal-TMO. Esta podría bien ser de iones de oxígeno, modificando la estructura electrónica en consecuencia (Tokura et al., 2017).

Ejemplos de óxidos empleados para estos dispositivos son los basados en HfO₂, con el que se han desarrollado dispositivos de dimensiones lineales menores que 5 nm, con tiempos de conmutación en el orden de 10 ns. Se han demostrado con ellos tiempos de operación ininterrumpida y bajo estrés de hasta 300 h a 250 °C, demostrando su funcionamiento en condiciones comparables con las de dispositivos no-volátiles (Govoreanu et al., 2011; Kai-Shin Li et al., 2014).

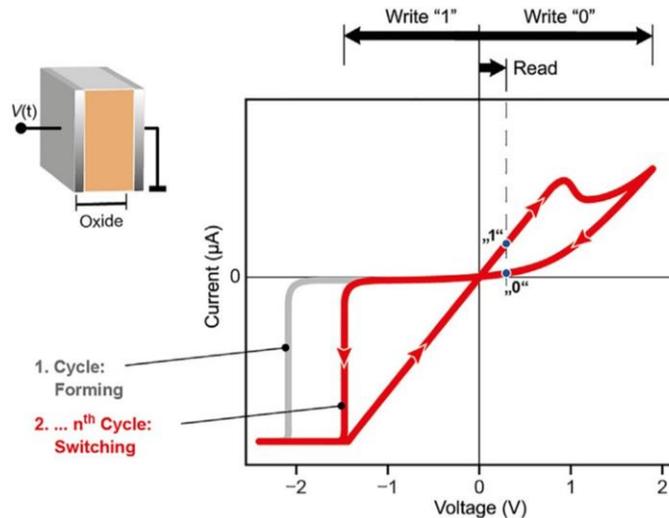


Figura 5. Esquema de una celda metal-TMO-metal, y diagrama corriente-voltaje para una ReRAM. La función de memoria ocurre a partir de la lectura de corriente ante un voltaje de prueba aplicado. La conmutación entre los dos estados de resistencia se realiza mediante un voltaje (Coll et al., 2019).

Transporte de espín

Una familia de aplicaciones distintas está comprendida por la etiqueta de *espintrónica*, que denota un abanico de propuestas que emplean el grado de libertad de espín para el procesamiento, conversión y almacenamiento de información. Estas se muestran particularmente atractivas por el límite dimensional de la electrónica, sus altas velocidades de operación y su menor consumo energético. En particular, el empleo de corrientes puramente de espín *-magnones*, excitaciones colectivas de momentos magnéticos- en aislantes con ordenamiento magnético se perfila como una estrategia para la creación de nuevas tecnologías (Chumak et al., 2015), como memorias basadas en espín (Chumak et al., 2017), y la mejora de otras, como transistores (Koo et al., 2009).

Los retos principales en esta vertiente están en la generación y detección de corrientes de espín en dispositivos con dimensiones espaciales del orden de ~ 100 nm, y con tiempos de vida suficientes para los procesos

de escritura/procesamiento/lectura de información.

Por otra parte, la prevalencia de tecnologías electrónicas exige la conversión espín-carga en ambas direcciones. Este proceso ocurre principalmente por medio de dos procesos con orígenes distintos, a decir, el *efecto Hall de espín* y el *efecto Rashba-Edelstein*, con este segundo siendo el más común en interfaces. En este caso hay una relación directa entre el espín y la dirección del momentum de las cargas libres, donde ocurre una acumulación de espín en un plano sin simetría de inversión (como en una interfaz) como consecuencia de una corriente eléctrica, posibilitado por un acoplamiento espín-órbita no-nulo y un campo eléctrico normal a la interfaz.

Notablemente este efecto se ha visto en interfaces de TMOs, y particularmente en la paradigmática $LaAlO_3 - SrTiO_3$, mostrando una magnitud importante y modulable (Caviglia et al., 2010). La corriente de espín para el efecto inverso Rashba-Edelstein es generada por medio de una técnica llamada *bombeo de espín*, y por medio de tunelamiento

a través de unas pocas capas atómicas de LaAlO_3 llega a la interfaz, donde una carga eléctrica es producida en consecuencia en el

gas de electrones bidimensional. Esto es ilustrado en la Figura 6.

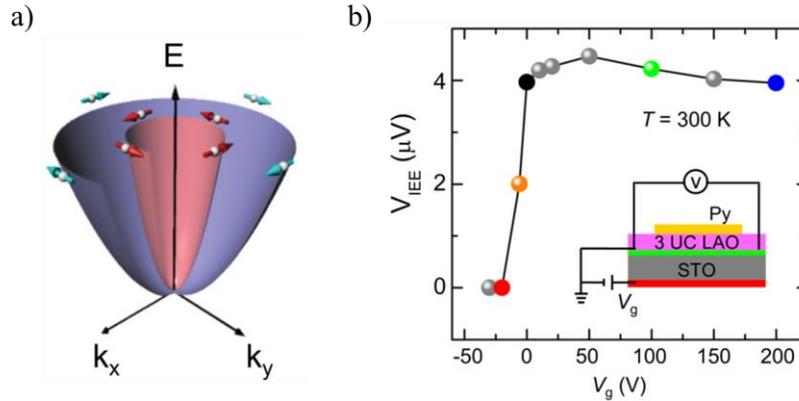


Figura 6. a) Dispersión de Rashba en una interfaz, con texturas de espín opuestas para los conos, que en presencia de un campo eléctrico crean al nivel de Fermi una densidad de espín neta no-nula. b) Voltaje generado como consecuencia del efecto Rashba-Edelstein inverso en el gas electrones bidimensional en la interfaz $\text{LaAlO}_3 - \text{SrTiO}_3$ como función del voltaje aplicado sobre la heteroestructura en el sustrato, con permaloy (Py) como fuente de la corriente de espín. Figuras tomadas de (Han et al., 2018).

Conclusiones

A lo largo de este artículo hemos recorrido un camino que ha empezado en la noción general de sistemas con alta correlación electrónica, y llevado a los óxidos de metales de transición, enfatizando el papel del oxígeno en ellos y su efecto sobre las interacciones entre electrones. En estos, la cercanía en las escalas de energía de múltiples grados de libertad complica la predicción y el entendimiento de sus fases y transiciones. Por otra parte, tomando como eje los métodos de deposición epitaxial, la heteroestructuración y la aplicación de distintos campos externos permiten acceder a estructuras y estados imposibles de obtener por otros medios, expandiendo el abanico de funcionalidades y posibles aplicaciones mediante novedosas relaciones estímulo-respuesta.

Actualmente, avances tecnológicos (en fuentes de luz, sensores y bajas temperaturas, altos campos electromagnéticos, láseres pulsados, etc.) son rápidamente incorporados al abanico

de técnicas espectroscópicas y de estímulos para estudiar óxidos con alta correlación electrónica bajo condiciones extremas y en gran detalle. Asimismo, los horizontes en la síntesis de nuevos materiales abren paso a heteroestructuras con capas tan delgadas como una sola celda unitaria, demostrando en ellas la estabilización de fases con posibilidades de aplicación en campos tan amplios como almacenamiento y conversión de energía, electrónica, espintrónica, cómputo cuántico y sensores.

Reconocimientos

Este trabajo ha sido escrito como parte de mis actividades de retribución social, habiendo recibido apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del programa de becas para posgrado en Alemania CONACYT-DAAD 2020 (CVU: 1071031) para cursar mi maestría en la Universidad de Stuttgart. Mucho del aprendizaje obtenido durante ese tiempo, y que parcialmente plasmo en este artículo, lo debo también a la guía que recibí durante mi

trabajo de tesis en el Instituto Max Planck para la Investigación del Estado Sólido.

Referencias

- Basov, D. N., Averitt, R. D., van der Marel, D., Dressel, M., & Haule, K. (2011). Electrodynamics of correlated electron materials. *Reviews of Modern Physics*, 83(2), 471–541. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.471>
- Bossini, D., Juraschek, D. M., Geilhufe, R. M., Nagaosa, N., Balatsky, A. V, Milanović, M., Srdić, V. V, Senjug, P., Topić, E., Barišić, D., Rubčić, M., Pajić, D., Arima, T., Savoini, M., Johnson, S. L., Davies, C. S., & Kirilyuk, A. (2023). Magnetoelectrics and multiferroics: theory, synthesis, characterisation, preliminary results and perspectives for all-optical manipulations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(27), 273001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acc8e1>
- Catalano, S., Gibert, M., Fowlie, J., Íñiguez, J., Triscone, J.-M., & Kreisel, J. (2018). Rare-earth nickelates RNiO₃: thin films and heterostructures. *Reports on Progress in Physics*, 81(4), 046501. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aaa37a>
- Cava, R., de Leon, N., & Xie, W. (2021). Introduction: Quantum Materials. *Chemical Reviews*, 121(5), 2777–2779. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01322>
- Caviglia, A. D., Gabay, M., Gariglio, S., Reyren, N., Cancellieri, C., & Triscone, J.-M. (2010). Tunable Rashba Spin-Orbit Interaction at Oxide Interfaces. *Physical Review Letters*, 104(12), 126803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.126803>
- Chumak, A. V, Serga, A. A., & Hillebrands, B. (2017). Magnonic crystals for data processing. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(24), 244001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa6a65>
- Chumak, A. V., Vasyuchka, V. I., Serga, A. A., & Hillebrands, B. (2015). Magnon spintronics. *Nature Physics*, 11(6), 453–461. <https://doi.org/10.1038/nphys3347>
- Coll, M., Fontcuberta, J., Althammer, M., Bibes, M., Boschker, H., Calleja, A., Cheng, G., Cuoco, M., Dittmann, R., Dkhil, B., El Baggari, I., Fanciulli, M., Fina, I., Fortunato, E., Frontera, C., Fujita, S., Garcia, V., Goennenwein, S. T. B., Granqvist, C.-G., ... Granozio, F. M. (2019a). Towards Oxide Electronics: a Roadmap. *Applied Surface Science*, 482, 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.312>
- Coll, M., Fontcuberta, J., Althammer, M., Bibes, M., Boschker, H., Calleja, A., Cheng, G., Cuoco, M., Dittmann, R., Dkhil, B., El Baggari, I., Fanciulli, M., Fina, I., Fortunato, E., Frontera, C., Fujita, S., Garcia, V., Goennenwein, S. T. B., Granqvist, C.-G., ... Granozio, F. M. (2019b). Towards Oxide Electronics: a Roadmap. *Applied Surface Science*, 482, 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.312>
- Cui, Z., Grutter, A. J., Zhou, H., Cao, H., Dong, Y., Gilbert, D. A., Wang, J., Liu, Y.-S., Ma, J., Hu, Z., Guo, J., Xia, J., Kirby, B. J., Shafer, P., Arenholz, E., Chen, H., Zhai, X., & Lu, Y. (2020). Correlation-driven eightfold magnetic anisotropy in a two-dimensional oxide monolayer. *Science Advances*, 6(15). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay0114>
- Dagotto, E. (2005). Complexity in Strongly Correlated Electronic Systems. *Science*, 309(5732), 257–262. <https://doi.org/10.1126/science.1107559>

- Di Castro, D., Cantoni, C., Ridolfi, F., Aruta, C., Tebano, A., Yang, N., & Balestrino, G. (2015). High-Tc Superconductivity at the Interface between the CaCuO₂ and SrTiO₃ Insulating Oxides. *Physical Review Letters*, *115*(14), 147001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.147001>
- Di Castro, D., Salvato, M., Tebano, A., Innocenti, D., Aruta, C., Prellier, W., Lebedev, O. I., Ottaviani, I., Brookes, N. B., Minola, M., Moretti Sala, M., Mazzoli, C., Medaglia, P. G., Ghiringhelli, G., Braicovich, L., Cirillo, M., & Balestrino, G. (2012). Occurrence of a high-temperature superconducting phase in (CaCuO₂)_n/(SrTiO₃)_m superlattices. *Physical Review B*, *86*(13), 134524. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.134524>
- Disa, A. S., Fechner, M., Nova, T. F., Liu, B., Först, M., Prabhakaran, D., Radaelli, P. G., & Cavalleri, A. (2020). Polarizing an antiferromagnet by optical engineering of the crystal field. *Nature Physics*, *16*(9), 937–941. <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0936-3>
- Eerenstein, W., Mathur, N. D., & Scott, J. F. (2006). Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature*, *442*(7104), 759–765. <https://doi.org/10.1038/nature05023>
- Gong, D., Yang, J., Hao, L., Horak, L., Xin, Y., Karapetrova, E., Stremper, J., Choi, Y., Kim, J.-W., Ryan, P. J., & Liu, J. (2022). Reconciling Monolayer and Bilayer Jeff=1/2 Square Lattices in Hybrid Oxide Superlattice. *Physical Review Letters*, *129*(18), 187201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.187201>
- Govoreanu, B., Kar, G. S., Chen, Y.-Y., Paraschiv, V., Kubicek, S., Fantini, A., Radu, I. P., Goux, L., Clima, S., Degraeve, R., Jossart, N., Richard, O., Vandeweyer, T., Seo, K., Hendrickx, P., Pourtois, G., Bender, H., Altimime, L., Wouters, D. J., ... Jurczak, M. (2011). 10×10nm² Hf/HfO_x crossbar resistive RAM with excellent performance, reliability and low-energy operation. *2011 International Electron Devices Meeting*, 31.6.1-31.6.4. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2011.6131652>
- Han, W., Otani, Y., & Maekawa, S. (2018). Quantum materials for spin and charge conversion. *Npj Quantum Materials*, *3*(1), 27. <https://doi.org/10.1038/s41535-018-0100-9>
- Hwang, H. Y., Iwasa, Y., Kawasaki, M., Keimer, B., Nagaosa, N., & Tokura, Y. (2012). Emergent phenomena at oxide interfaces. *Nature Materials*, *11*(2), 103–113. <https://doi.org/10.1038/nmat3223>
- Iannaccone, G., Bonaccorso, F., Colombo, L., & Fiori, G. (2018). Quantum engineering of transistors based on 2D materials heterostructures. *Nature Nanotechnology*, *13*(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0082-6>
- Imada, M., Fujimori, A., & Tokura, Y. (1998). Metal-insulator transitions. *Reviews of Modern Physics*, *70*(4), 1039–1263. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.70.1039>
- Jilili, J., Tolbatov, I., Cossu, F., Rahaman, A., Fiser, B., & Kahaly, M. Upadhyay. (2023). Atomic scale interfacial magnetism and origin of metal-insulator transition in (LaNiO₃)_n/(CaMnO₃)_m superlattices: a first principles study. *Scientific Reports*, *13*(1), 5056. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30686-w>
- Kai-Shin Li, Ho, C., Ming-Taou Lee, Min-Cheng Chen, Cho-Lun Hsu, Lu, J. M., Lin, C. H., Chen, C. C., Wu, B. W., Hou, Y. F., Lin, C. Yi., Chen, Y. J., Lai, T. Y., Li, M. Y., Yang, I., Wu, C. S., & Fu-Liang Yang. (2014). Utilizing Sub-5 nm sidewall electrode technology for atomic-scale

- resistive memory fabrication. *2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/VLSIT.2014.6894402>
- Kanamori, J. (1959). Superexchange interaction and symmetry properties of electron orbitals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 10(2–3), 87–98. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90061-7](https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90061-7)
- Keimer, B., Kivelson, S. A., Norman, M. R., Uchida, S., & Zaanen, J. (2015). From quantum matter to high-temperature superconductivity in copper oxides. *Nature*, 518(7538), 179–186. <https://doi.org/10.1038/nature14165>
- Kimura, T., Goto, T., Shintani, H., Ishizaka, K., Arima, T., & Tokura, Y. (2003). Magnetic control of ferroelectric polarization. *Nature*, 426(6962), 55–58. <https://doi.org/10.1038/nature02018>
- King, P. D. C., Wei, H. I., Nie, Y. F., Uchida, M., Adamo, C., Zhu, S., He, X., Božović, I., Schlom, D. G., & Shen, K. M. (2014). Atomic-scale control of competing electronic phases in ultrathin LaNiO₃. *Nature Nanotechnology*, 9(6), 443–447. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.59>
- Koo, H. C., Kwon, J. H., Eom, J., Chang, J., Han, S. H., & Johnson, M. (2009). Control of Spin Precession in a Spin-Injected Field Effect Transistor. *Science*, 325(5947), 1515–1518. <https://doi.org/10.1126/science.1173667>
- Nakagawa, N., Hwang, H. Y., & Muller, D. A. (2006). Why some interfaces cannot be sharp. *Nature Materials*, 5(3), 204–209. <https://doi.org/10.1038/nmat1569>
- Nanda, B. R. K., & Satpathy, S. (2008). Effects of strain on orbital ordering and magnetism at perovskite oxide interfaces: LaMnO₃/SrMnO₃. *Physical Review B*, 78(5), 054427. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.054427>
- Ngai, J. H., Walker, F. J., & Ahn, C. H. (2014). Correlated Oxide Physics and Electronics. *Annual Review of Materials Research*, 44(1), 1–17. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113248>
- Ohtomo, A., & Hwang, H. Y. (2004). A high-mobility electron gas at the LaAlO₃/SrTiO₃ heterointerface. *Nature*, 427(6973), 423–426. <https://doi.org/10.1038/nature02308>
- Ramesh, R., & Schlom, D. G. (2019). Creating emergent phenomena in oxide superlattices. *Nature Reviews Materials*, 4(4), 257–268. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0095-2>
- Reyren, N., Thiel, S., Caviglia, A. D., Kourkoutis, L. F., Hammerl, G., Richter, C., Schneider, C. W., Kopp, T., Rüetschi, A.-S., Jaccard, D., Gabay, M., Muller, D. A., Triscone, J.-M., & Mannhart, J. (2007). Superconducting Interfaces Between Insulating Oxides. *Science*, 317(5842), 1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.1146006>
- Samal, D., Gauquelin, N., Takamura, Y., Lobato, I., Arenholz, E., Van Aert, S., Huijben, M., Zhong, Z., Verbeeck, J., Van Tendeloo, G., & Koster, G. (2023). Unusual structural rearrangement and superconductivity in infinite layer cuprate superlattices. *Physical Review Materials*, 7(5), 054803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.7.054803>
- Tokura, Y., Kawasaki, M., & Nagaosa, N. (2017). Emergent functions of quantum materials. *Nature Physics*, 13(11), 1056–1068. <https://doi.org/10.1038/nphys4274>
- Tokura, Y., Seki, S., & Nagaosa, N. (2014). Multiferroics of spin origin. *Reports on Progress in Physics*, 77(7), 076501. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/7/076501>

- Yang, Z., Ko, C., & Ramanathan, S. (2011). Oxide Electronics Utilizing Ultrafast Metal-Insulator Transitions. *Annual Review of Materials Research*, 41(1), 337–367. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-062910-100347>
- Zaanen, J., Sawatzky, G. A., & Allen, J. W. (1985). Band gaps and electronic structure of transition-metal compounds. *Physical Review Letters*, 55(4), 418–421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.418>
- Zhang, J., & Averitt, R. D. (2014). Dynamics and Control in Complex Transition Metal Oxides. *Annual Review of Materials Research*, 44(1), 19–43. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113258>