

# Dos apuntes sobre control mecánico y surfeo de electrones en sólidos cristalinos

## Control y transporte de electrones mediante efecto piezoeléctrico. Piezopotencial estático

La tensión mecánica (tracción/estiramiento o contracción/compresión) sobre un sólido afecta a las vibraciones atómicas de su red cristalina, y de ahí a las propiedades eléctricas, electrónicas y ópticas, particularmente si es semiconductor, ya que se altera drásticamente la estructura de bandas, como es el caso de zinc-blenda, wurzita, GaAs, InAs, ZnO, ZnS, etc. Nótese, sin embargo, que la mayoría de los piezoeléctricos, como el cuarzo descubierto en 1880 por los hermanos P. y J. Curie, la turmalina, los azúcares, la peroskovita y cerámicas, son aislantes con mayor respuesta piezoeléctrica que los anteriores. El acoplamiento entre propiedades piezoeléctricas y semiconductoras permite crear cargas, acumularlas y descargarlas en un circuito externo. Desde 2005, Z. L. Wang y colaboradores (y otros colegas de diversos países) han desarrollado aplicaciones electrónicas y optoelectrónicas de la piezoelectricidad, aprovechando, por ejemplo, que nanohilos y nanocintas pueden aguantar deformaciones mecánicas “exageradas” sin romperse; como además son materiales biocompatibles, son de interés en medicina. Wang ha acuñado dos nombres/conceptos origen de sendas tecnologías: la piezotrónica y la piezofototrónica [1]. La piezotrónica es el resultado de usar un piezopotencial para construir dispositivos que permiten controlar procesos de generación, separación, recombinación y transporte de carga, por ejemplo, en una heterounión p-n o en la unión metal-semiconductor (como los compuestos III-V y II-VI, entre los que está el ZnO). Ya se han construido transistores de efecto de campo piezoeléctrico (sigla en inglés *PE-FET*) y diodos piezoeléctricos. La piezofototrónica resulta del acoplamiento mutuo entre piezoelectricidad, excitación fotónica y transporte en semiconductores. Ello permite sintonizar y controlar procesos electroópticos a partir de la deformación mecánica ligada a un piezopotencial. Instrumentos optoelectrónicos fabricados con wurzita exhiben mejor rendimiento que tradicionales células solares, detectores fotónicos y diodos emisores de luz (sigla en inglés *LED*).

En la figura 1 el bloque de tres columnas a la izquierda ilustra la compresión y el estiramiento, mediante una tensión “f” que da lugar al piezopotencial (en primera aproximación proporcional a la tensión aplicada) cuya distribución se da en la columna derecha de ese bloque (rojo, positivo y azul,

negativo). Para un nanohilo de altura/longitud 600 nm y lado de la base hexagonal 25 nm, con  $f = 10^2$  nN se consigue una diferencia de potencial de casi medio voltio, de 0.2 a -0.2 V, entre sus extremos. Hay cambio de polaridad al cambiar el sentido de la tensión aunque el valor de la diferencia de potencial es el mismo. Similar cambio también ocurre con el efecto inverso (panel central), pues al cambiar la polaridad de la batería cambia el sentido de la deformación elástica. El piezopotencial creado en el nanohilo puede ser usado para encauzar el flujo de electrones sobre un circuito externo dando lugar a un nanogenerador (batería/pila) que transforma energía mecánica en eléctrica (panel extremo derecho); ya se han fabricado capaces de producir hasta 3 V lo que permite obviar las pilas en muy diversas aplicaciones de uso diario.

Otra aplicación piezotrónica se ilustra en la figura 2, donde hay un LED piezotrónico frente al tradicional. Por limitación de espacio he dejado de lado la piezoelectricidad debida a pandeo o flexión (continua o alterna) en láminas muy delgadas cuyo espectacular interés tecnológico ha sido recientemente descubierto en películas de MoS2 (W. Wu *et al.*, doi:10.1038/nature13792, 15 Octubre 2014).

En la aproximación “lineal” eliminada la causa desaparece el efecto pero, en la realidad, esto último no es siempre así. Ya han empezado a ser exploradas las consecuencias de elasticidad y piezoelectricidad no lineales y de su acopla-

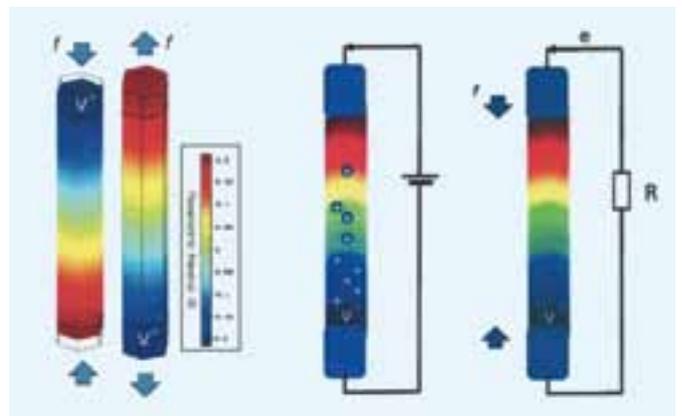
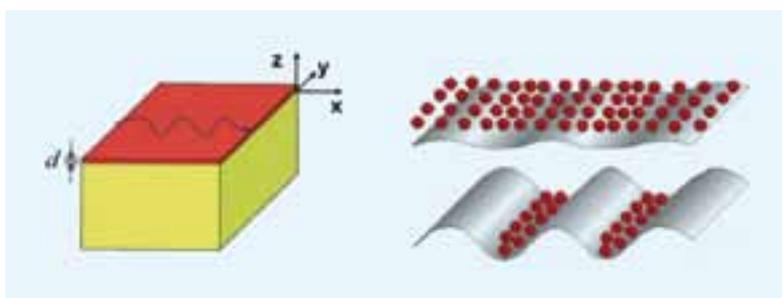


Fig. 1. Nanohilo piezoeléctrico (nótese la anisotropía). Bloque izquierdo de tres columnas: compresión, estiramiento y correspondiente piezopotencial estático. Panel central: efecto piezoeléctrico inverso. Panel derecho: corriente en un circuito externo (adaptada de figuras de Z. L. Wang).



**Fig. 2.** LED tradicional vs piezotrónico entre dos electrodos (bordes amarillos). Panel izquierdo: LED tradicional fabricado usando una heterounión p-n. Paneles central y derecho: LED con n reemplazado por ZnO, sometido a compresión (central) y tracción (derecho), respectivamente de modo que el signo y valor del piezopotencial controlan la fotoemisión, generación de carga y características de su transporte.

**Fig. 3.** SAW y surfeo electrónico (piezopotencial viajero sub o supersónico) Panel izquierdo: una SAW/ola sobre un sustrato piezoelectrónico cubierto de una capa o película de otro material buscando controlar adecuadamente amplitud, longitud de onda y dispersión. Panel derecho: imagen fantástica del surfeo sobre la SAW (y su correspondiente onda de polarización o viajero periódico voltaje) de amplitud pequeña (arriba) y grande (abajo) a lo largo del sustrato [figuras extraídas del archivo del AIP con comentarios de artículos publicados en sus revistas, aquí corresponde a una publicación de Wixforth y colaboradores en 1999].



miento mutuo. Hay casos en los que la elasticidad, anarmónica, más allá de la ley de Hooke, muestra efectos tales como un incremento de casi un orden de magnitud en la respuesta eléctrica o incluso la generación de campos de polaridad opuesta a la predicción teórica basada en el caso lineal.

### Surfeo de electrones sobre olas acústicas en cristales piezoelectrónicos. Piezopotencial como onda viajera sub o supersónica

El surfeo electrónico, aparentemente macroscópico, sobre ondas acústicas superficiales en sólidos cristalinos piezoelectrónicos tanto a temperatura ambiente (circa 300 K) como a bajas temperaturas, por razones técnicas en la detección, es conocido experimentalmente desde al menos 1986, gracias a los trabajos de A. Wixforth y colaboradores [2-6]. Hubo intentos una década antes que no fueron concluyentes por usar el silicio como piezoelectrónico que da muy débil respuesta respecto a la energía térmica (ruido) de los electrones (en castellano las ondas en superficies abiertas al aire se denominan olas; sigla en inglés SAW). Conviene subrayar que las SAW son el límite de onda “larga” de los fonones superficiales en un cristal que, a su vez, son los cuantos de ondas de Rayleigh (en realidad decir macrosurfeo es jugar con palabras y conceptos pues, aunque el tratamiento del sólido pueda hacerse clásicamente, los electrones y su interacción con los átomos del sólido cristalino han de ser tratados cuánticamente). Esas ondas superficiales, fueron predichas por Lord Rayleigh, en 1885, para sólidos elásticos arbitrarios. Han sido muy utilizadas desde el invento por R. M. White y F. W. Volmer en 1965 del transductor interdigital (sigla en inglés IDT) para la conversión de señales eléctricas en SAW y viceversa, usando el efecto piezoelectrónico inverso [7]. La espectacularidad de las SAW (“celebrity” en inglés quizá sea lo adecuado, como en los medios de comunicación de masas) vino cuando la revista *Nature* (revista científica que también vive de la publicidad) publicó dos trabajos en un mismo número de 2011, ambos relativos al surfeo en láminas de GaAs [8, 9]. Sus correspondientes alegatos publicitarios, por autores ajenos a dichos trabajos, no hicieron justicia a predecesores y se embarcaron en fantaciencia [10].

El panel izquierdo de la figura 3 ilustra una SAW armónica, típica de la elasticidad lineal. El transporte de electrones, como forma de macrosurfeo [11], depende de la amplitud de la deformación de esa “cinta transportadora” ilustrada en el panel derecho (polarización eléctrica y no deformación superficial). Apenas hay transporte de electrones si la amplitud es muy pequeña. Una onda lineal, armónica, no tiene dispersión cuando se propaga sobre la superficie plana de un sustrato homogéneo y por eso puede recorrer bastante camino (por ej. de varios  $\mu\text{m}$  a varios mm), con velocidad que sólo llega a la del sonido en el sólido. El proceso de transporte se estropearía si hay inhomogeneidades en el sustrato que darían lugar a la desaparición de la SAW armónica según avanza. Cabe crear y propagar SAW anarmónicas capaces de recorrer inalteradas, con velocidad supersónica, un recorrido macroscópico tan largo como queramos. Eso se puede conseguir con adecuados sustratos (heteroestructuras tales como una capa de GaAs cubierta de otra de ZnO, una capa de LiNbO<sub>3</sub> cubierta de otra de SiO depositada por evaporación, o una capa InGaAs sobre otra de LiNbO<sub>3</sub>) donde, por ejemplo, la elasticidad no lineal vaya combinada con efecto dispersivo en la propagación. Este territorio ha sido poco explorado hasta el presente pues hasta ahora lo prioritario ha sido el controlable retardo que una SAW subsónica tiene respecto a la propagación electromagnética, cinco órdenes de magnitud más rápida). Es el campo eléctrico (aquí viajero piezopotencial) que la acompaña lo que hace que la SAW no sólo sirva al transporte sino también que permita el acoplamiento a un circuito eléctrico externo, a otras SAW o, verbigracia, a portadores de carga en semiconductores, como cabe esperar de lo ya dicho sobre el papel de la piezoelectricidad y el piezopotencial estático en semiconductores, pues la SAW permite modular propiedades ópticas y electrónicas en semiconductores debido a la perturbación que genera en el retículo cristalino.

Como ha sido mostrado por Wixforth, Ford y Meunier (véase también [12-14]) electrones o agujeros fotogenerados (con adecuado láser) pueden ser capturados y subsecuentemente transportados por SAW como forma de surfeo de los electrones sobre una ola acústica. La figura 4 muestra un detector de un electrón basado en la combinación de tal transporte con detección de carga mediante transistores de un único electrón (sigla en inglés SET). Los fotones que llegan generan electrones y agujeros en la entrada G que está en la trayectoria de la SAW generada por el IDT de la izquierda. Electrones y agujeros que son atraídos por las puertas  $g_n$  y  $g_p$  y transportados (un recorrido del orden de varios  $\mu\text{m}$ ) por la SAW (velocidad en el rango varios  $\mu\text{m}/\text{ns}$ ) hacia la zona de detección a la derecha del esquema donde estaría

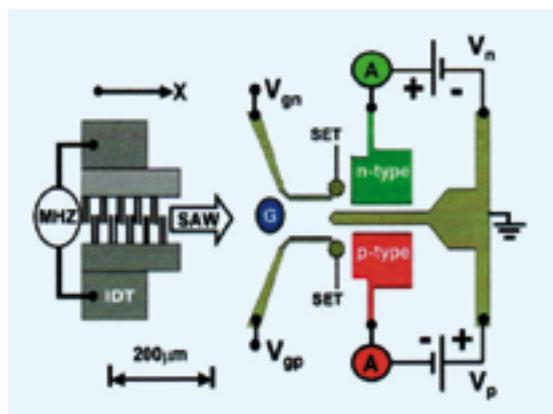


Fig. 4. Esquema de un prototipo para captar, transportar y detectar, por ej., un único electrón gracias a la acción de una SAW.

el SET. Por simplificar, en la figura no hay SET, sino un electrómetro detector de la carga. El transporte puede ser de un punto cuántico a izquierda a otro a la derecha y vale para un único electrón como para dos. En este último caso Meunier y colegas [8] avanzan la idea que aun cuando el spin los liga cabe separarlos y enviar uno solo, lo que, por analogía con lo que ocurre con fotones, piensan que puede ser de interés para la transferencia de información cuántica que está a la base de la teleportación. Por la complejidad tanto de los dispositivos experimentales como la amplitud de las implicaciones tecnológicas, viables o no [10], de lo obtenido hasta ahora con el surfeo electrónico con SAW cara al desarrollo de la óptica electrónica cuántica (óptica cuántica con electrones "surferos") sugerimos al lector interesado acuda a las referencias para conocer los detalles técnicos.

La figura 5 muestra el esquema del experimento de Ford y colaboradores [9] con dos IDT ofreciendo la posibilidad de ida y vuelta a los electrones, como en un juego de ping-pong, en palabras de los autores.

### Apéndice 1. Piezoelectricidad y algunas de sus consecuencias electrónicas

Al aplicar una tensión mecánica (tracción, estiramiento o alargamiento; contracción o compresión; *stress* en inglés) a un sólido cristalino éste responde elásticamente deformándose (puede cambiar su tamaño o su forma; *strain* en inglés) lo que origina corrimientos en la red cristalina. Esta se desencaja y los nudos negativos se corren respecto a los positivos de manera que en las caras del cristal aparecen cargas eléctricas superficiales creando un piezopotencial, en primera aproximación proporcional a la deformación mecánica. En efecto, la tensión mecánica induce momento dipolar local y, siendo el material homogéneo, polarización global con correspondiente voltaje de modo que al comprimir una cara acumula cargas positivas y negativas la opuesta, siendo al revés al estirar. Recíprocamente, un voltaje,  $V$ , conlleva deformación mecánica que según el signo de aquél

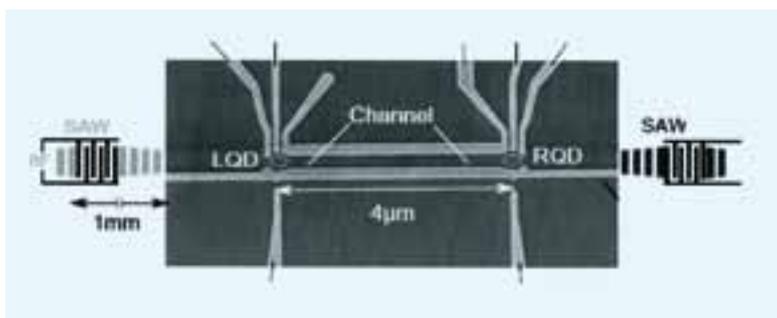


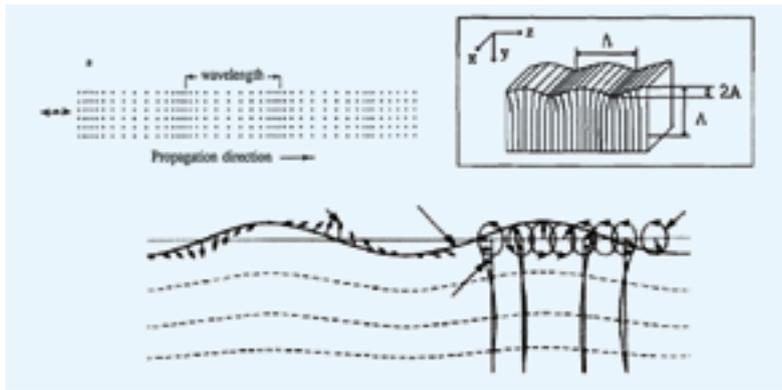
Fig. 5. Esquema de un prototipo para captar, transportar y detectar, por ej., un único electrón desde un punto cuántico (LQD) hasta otro punto cuántico (RQD) gracias a la acción de una SAW. Como hay dos IDT existe la posibilidad, demostrada por Ford y colaboradores, de un efecto ping-pong con el electrón yendo primero de izquierda a derecha y luego retornando de derecha a izquierda.

es compresión o estiramiento. Recordemos que el campo eléctrico  $E$  (mejor desplazamiento eléctrico  $D$ ) va de (+) a (-) siendo su valor, en primera aproximación, proporcional a la tensión aplicada. Así se puede convertir energía mecánica en eléctrica y viceversa.

La piezoelectricidad sólo es posible si cristalográficamente el sólido cristalino no tiene centro de simetría (centro de inversión). Un cristal isotrópico no puede producir un efecto vectorial como un desplazamiento eléctrico. Un cristal posee centro de simetría (o centro de inversión) cuando, cualquiera que sea la dirección que en él se elija, las propiedades del cristal en esa dirección y en la opuesta son idénticas. Entonces, a cada cara del cristal le corresponde otra paralela. En los cristales que carecen de centro de simetría, todo eje de simetría perpendicular a una cara es un eje polar y el cristal presenta configuraciones distintas en los dos extremos del eje polar: es hemimorfo. La wurzita es un tetraedro con vértices ocupados por iones negativos equivalentes y con un ion positivo, de carga cuádruple, en su centro de gravedad, de modo que este centro lo es para ambas distribuciones de carga (no hay dipolo eléctrico). Al comprimir el vértice contra la base, el retículo de los iones negativos se deforma diferentemente de lo que ocurre al de los positivos. Dejan de coincidir sobre un mismo centro creando un dipolo eléctrico. Todos los dipolos formados en las diferentes celdillas tendrán igual magnitud, dirección y sentido. Así, por adición constructiva resulta polarización (macroscópica) homogénea, a lo largo del eje de aplicación de la tensión, en el cristal apareciendo cargas en todas las caras que no sean paralelas a esa polarización. Recíprocamente, aplicando un voltaje el sólido experimenta una deformación mecánica elástica. Digamos de paso que si dos hilos metálicos conectados a una pila se colocan en las extremidades de una lámina de mica no hay corriente eléctrica porque la mica es un aislante. Pero en cambio se carga eléctricamente de modo que desconectada la pila se consigue un pulso de corriente eléctrica juntando los hilos metálicos.

### Apéndice 2. Ondas de Rayleigh y SAW

Los paneles de la figura 6 ilustran ondas elásticas (longitudinales, acústicas, SAW) en sólidos

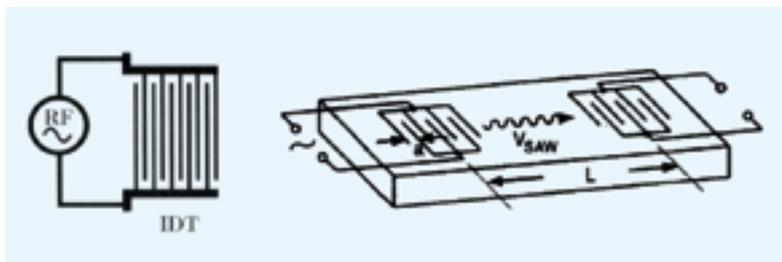


**Fig. 6.** Ondas en sólidos. Panel izquierdo: típica onda elástica longitudinal, acústica, en el volumen de un sólido cristalino. Panel central: onda/ola de Rayleigh en la superficie de un sólido. Panel derecho: detalles del movimiento en la superficie abierta al aire con decaimiento interno exponencial aproximadamente del orden de la longitud de onda que es muy superior a su amplitud (a la izquierda en cada punto se da la instantánea de su vector velocidad, y a la derecha con la flecha inclinada hacia arriba se señala el vector desplazamiento de cada punto con su trayectoria local cerrada; la línea continua central señalada con una flecha inclinada hacia abajo es la forma instantánea de la onda). Otras ondas son las de A. E. H. Love (1911).

cristalinos [15, 16]. Como la distancia interatómica es del orden del Ångstrom, la aproximación continua es aceptable para ondas elásticas de longitud superior a  $10^2$  Å (frecuencias inferiores a  $10^{11}$ – $10^{12}$  Hz). El panel izquierdo corresponde a una onda en volumen mientras que los otros dos describen la onda superficial (lineal) de Rayleigh que es una combinación de compresión-expansión y cizalla.

Una SAW propagándose sobre la superficie plana de un sustrato elástico (lineal) homogéneo, piezoeléctrico o no, no exhibe dispersión porque el sistema no posee escala alguna para la curvatura de la relación de dispersión de la onda. Se puede conseguir dispersión de la SAW depositando sobre el sustrato de base una capa o película de otro material con espesor adecuado. Tal heteroestructura estratificada, con base elásticamente no lineal, permite producir SAW solitónicas posibilitando “grandes” distancias y velocidades tanto sub- como supersónicas. Hasta ahora parece que sólo ha habido interés en el hecho de que, a igual frecuencia, las SAW viajan a velocidades muy inferiores a la de las ondas electromagnéticas de igual frecuencia. Una SAW solitónica podría ser *cnoidal* periódica, resultado del balance dinámico entre no linealidad y dispersión, tal como ocurre con la ecuación de Boussinesq-Korteweg-de Vries (BKdV), o con evolución no lineal equilibrada por una transformada de Hilbert (no local) que describa la

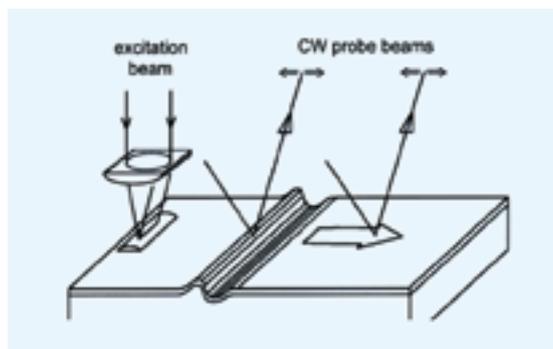
**Fig. 7.** Panel izquierdo: transductor interdigital (IDT); panel derecho: montaje experimental con dos IDT (emisor y receptor, respectivamente) que pueden ser litográficamente impresos (metálicos) en los extremos del sustrato sólido. La longitud de onda es el doble de la que es la periodicidad del IDT. Hay no linealidad en una SAW por su creación o por la evolución en un material elásticamente no lineal (con o sin dispersión). El recorrido puede ser tan largo como se quiera si la SAW es solitónica.



interacción entre componentes horizontales y verticales de la onda, obviando así la explícita consideración de su penetración hacia abajo, o sea hacia el volumen (algo similar ocurre en fluidos estratificados) [11].

Cuando un voltaje RF se aplica a un IDT genera un campo eléctrico (una onda electrostática) espacialmente periódico con longitud de onda,  $L$ , igual al espaciado entre sus electrodos (figura 7, panel izquierdo). Ese campo eléctrico causa una deformación periódica de la superficie del sustrato debido al efecto piezoeléctrico inverso. Cada par de electrodos excita una SAW de tal modo que todas las SAW generadas por los diferentes electrodos cooperan para producir una significativa SAW. Eso se consigue usando el IDT de modo que una SAW viaje de un electrodo a otro precisamente en el intervalo de tiempo en que el voltaje RF se repite ( $T = L/v_{SAW}$ ). Las velocidades de las SAW están en el rango de los km/s (sonido) que es cien mil veces inferior ( $10^{-5}$ ) a la de las ondas electromagnéticas (EM). Así, enviando una EM libre en paralelo con la acústica emitida por el IDT emisor, con respecto a la otra ésta aparece retardada, tras ser retransformada y reemitida por el otro IDT receptor. Además, las SAW tienen muy pequeña longitud de onda, cien mil veces menor ( $10^{-5}$ ) que las de la EM de igual frecuencia, por lo que dispositivos que usan SAW permiten tamaños mucho más pequeños que aparatos de EM y pueden imprimirse litográficamente. Las características de las SAW pueden ser modificadas aplicando tensiones externas, campos eléctricos o variando la temperatura, amén de jugando con la complejidad de la heteroestructura, por ejemplo bicapa del sustrato. Las figuras 7 y 8 ilustran dos montajes para excitar SAW, uno usando un IDT y otro un láser, respectivamente.

Nayanov [17] utilizó un sustrato de  $\text{LiNbO}_3$ , elásticamente no lineal, sobre el que depositó, por evaporación en vacío, una película aislante de  $\text{SiO}_2$  de 50 nm de espesor, induciendo así la posibilidad de dispersión. Con un transductor, a la frecuencia de 114 MHz con una densidad de flujo de potencia acústica variable en  $10^2$ – $3 \cdot 10^2$  W/mm<sup>2</sup>, lanzó una onda sinusoidal y observó con una sonda electrodinámica móvil a lo largo del sustrato paralela al frente de la onda viéndola con un osciloscopio, como la correspondiente onda de Rayleigh, según la distancia al transductor, evolucionó hacia una secuencia de pulsos o forma de apariencia cnoidal como la solución periódica de la ecuación BKdV (figura 9, panel izquierdo; rango de dispersión débil con no linealidad del sustrato también adecuadamente pequeña) [11]. Otras formas observadas por Nayanov parecen ser mejor descritas por la envolvente solución de una ecuación de Schrödinger no lineal (NLS), o incluso por soluciones de una



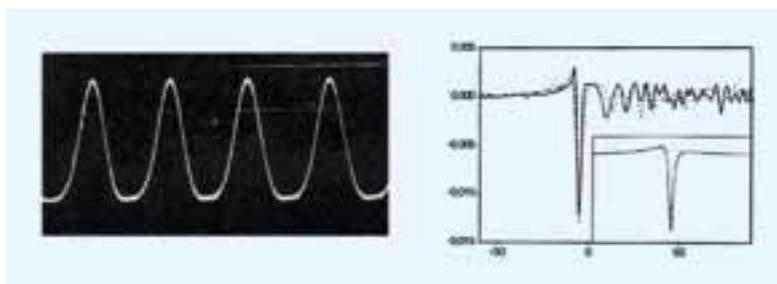
**Fig. 8.** Excitación de una SAW con un láser pulsado y detección con dos láseres continuos colocados a lo largo del recorrido de la SAW. Observación por interferometría diferencial, por interferencia de dos ondas reflejadas en sendos puntos de la superficie, o dos ondas reflejadas en un mismo punto iluminado por dos diferentes rayos láser.

ecuación integro-diferencial no local (con transformada de Hilbert) como antes mencionado o incluso de otras más complejas.

Hess y colaboradores [18-21], usando el esquema de la figura 8, experimentaron con diversas heteroestructuras elásticamente no lineales jugando con dispersión tanto normal como anómala lo que depende, por ejemplo, de la película depositada en una bicapa. Entre otros casos usaron un sustrato de sílice fundida —isótropa— recubierta de una película de NiCr (80/20%) de 300 nm de espesor o de NiTi de 50 nm y un sustrato de silicio —anisótropo— Si[111] recubierto de SiO<sub>2</sub> de 110 nm depositado por oxidación a alta temperatura. Utilizaron un láser pulsado (1.064 μm con pulsos en el rango 30–60 mJ y de 1–8 ns de duración sobre una línea de 7 mm de longitud y anchura 30 mm usando una lente cilíndrica) como iniciador de la onda de Rayleigh (tras producir una onda de choque por la evaporación explosiva de una suspensión de polvo de carbono preparada para absorber toda la radiación láser). Con otro continuo doble (10<sup>2</sup> mW, 532 nm) observaron por reflexión la evolución de la onda a lo largo del recorrido (ambos detectores separados 15 mm estando el primero a 17 mm del IDT inyector). La figura 9 (panel derecho) ilustra una de las formas observadas con el mencionado sustrato de silicio. Es de señalar que ondas de ecuaciones como la BKdV con dispersión normal van a velocidades supersónicas [11]. En casos de dispersión anómala la velocidad suele ser subsónica (recordemos que por “sónica” se entiende la velocidad de la onda lineal de Rayleigh en el sustrato “desnudo”). La figura recuadrada dentro del panel derecho se parece, invertida, a un sombrero mejicano (o *lump solution* en inglés).

### Agradecimientos

Mi agradecimiento a Chris Ford, Rob McNeill, Tristan Meunier, Valdimir I. Nayanov y Achim Wixforth por iluminarme con sus ideas y experimentos.



**Fig. 9.** Formas no lineales de SAW. Panel izquierdo: oscilograma de una de las ondas (periódicas) observadas sobre el sustrato piezoeléctrico estructurado bicapa LiNbO<sub>3</sub>(SiO). Panel derecho (caso del sustrato de silicio, descrito en el texto principal): la línea punteada es una forma observada y las líneas continuas son predicciones computacionales; la del recuadro interior pequeño se parece a una de las soluciones de la ecuación de Kadomtsev-Petviashvili [11] en cuasi-dos dimensiones.

### Referencias

- [1] Z. L. WANG, *Piezotronics and piezo-phototronics* (Springer, Berlin, 2012).
- [2] A. WIXFORTH, J. P. KOTTHAUS y G. WEIMANN, *Phys. Rev. Lett.* **56** 2104 (1986).
- [3] M. ROTTER, A. V. KALAMEITSEV, A. O. GOVOROV, W. RUILE y A. WIXFORTH, *Phys. Rev. Lett.* **82** 2171 (1999).
- [4] M. STREIBL, A. WIXFORTH, J. P. KOTTHAUS, A. O. GOVOROV, C. KADOV y A. C. GOSSARD, *Appl. Phys. Lett.* **75** 4139 (1999).
- [5] S. VOLK, F. J. R. SCHÜLEIN, F. KNALL, D. REUTER, A. D. WIECK, T. A. TRUONG, H. KIM, P. M. PETROFF, A. WIXFORTH y H. J. KRENNER, *NanoLett.* **10** 3399 (2010).
- [6] F. J. R. SCHÜLEIN, K. MÜLLER, M. BICHLER, G. KOBLMÜLLER, J. J. FINLEY, A. WIXFORTH y H. J. KRENNER, *Phys. Rev. B* **88** 085307 (2013).
- [7] R. M. WHITE y F. W. VOLMER, *Appl. Phys. Lett.* **7** 314 (1965).
- [8] S. HERMELIN, S. TAKADA, M. YAMAMOTO, S. TARUCHA, A. D. WIECK, L. SAMINADAYAR, C. BÄUERLE, y T. MEUNIER, *Nature* **477** 435 (2011).
- [9] R. P. G. MCNEILL, M. KATAOKA, C. J. B. FORD, C. H. W. BARNES, D. ANDERSON, G. A. C. JONES, I. FARRER y D. A. RITCHIE, *Nature* **477** 439 (2011).
- [10] Y. POMEAU, “Surfing electrons in quantum computers”, en R. G. Rubio *et al.* (compiladores), *Without bounds: a scientific canvas of nonlinearity and complex dynamics*, pp. 467-71 (Springer, Berlin, 2013).
- [11] M. G. VELARDE y P. DIAZ ESPINOSA, *REF* **27**, n. 3 24 (2013).
- [12] T. PALACIOS, F. CALLE y J. GRAJAL, *Appl. Phys. Lett.* **84** 3166 (2004).
- [13] F. CALLE, J. L. PEDRÓS, T. PALACIOS y J. GRAJAL, *Physica Status solidi C* **2** 976 (2005).
- [14] F. CALLE, J. GRAJAL y J. L. PEDRÓS, *Electronics Lett.* **40** 1384 (2004).
- [15] A. A. OLINER, (compilador), *Acoustic surface waves* (Springer, Berlin, 1978).
- [16] A. MAYER, *Phys. Reports* **256** 237 (1995).
- [17] V. I. NAYANOV, *JETP Lett.* **44** 314 (1986).
- [18] P. HESS, *Phys. Today* **55**, n. 3 42 (2002).
- [19] A. M. LOMONOSOV, P. HESS y A. P. MAYER, *Phys. Rev. Lett.* **88** 076104 (2002).
- [20] A. A. KOLOMENSKI, V. A. LIUBIMOV, S. N. JEREBTISOV y H. A. SCHUESSLER, *Rev. Sci. Instr.* **74** 448 (2003).
- [21] C. ECKL, A. S. KOVALEV, A. P. MAYER, A. M. LOMONOSOV y P. HESS, *Phys. Rev. E* **70** 046604 (2004).