

FISICA DEL ESTADO SOLIDO: UN PANORAMA EXPERIMENTAL *

Feliciano Sánchez Sinencio[†]

Centro de Investigación del IPN

ABSTRACT

This work originated from an invitation extended to this author by the Universidad Autonoma de Puebla to address the undergraduate students of that University. Here, we present a general review of some topics in the field of Solid State Physics. We emphasize mainly the work done in the experimental area. Some research techniques are introduced and their powerful applications are demonstrated. Thus, we show the close relation between scientific advances and modern technology.

RESUMEN

Este trabajo se originó de una invitación que la Universidad Autónoma de Puebla hizo al autor para dictar una conferencia dirigida a los estudiantes de licenciatura de la propia Universidad. Aquí se hace una introducción somera de algunos tópicos de la Física del Estado Sólido. Se enfatiza fundamentalmente el trabajo realizado dentro de la Física Experimental. Se presentan algunas técnicas de investigación y se muestra su potencialidad. Se resalta la relación estrecha entre los avances científicos y la tecnología moderna.

En este trabajo se intenta dar un panorama experimental de la Física del Estado Sólido. Se muestra someramente como la humanidad ha ido dando respuesta a interrogantes sobre la naturaleza de los materiales sólidos. Sobre este particular se ocurren preguntas tales como: ¿Por qué cuando toco los metales de las ventanas, de las sillas, de los cubiertos, etc. me parece que están más fríos que la madera o que las alfombras?, ¿Por qué me es bastante fácil doblar el clip que está en mi escritorio, y cuando deseo hacer lo mismo con una barrita de vidrio ésta se quiebra?, ¿Por qué puedo ver con facilidad a través de un vidrio grueso

* Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por: PNCB-CONACyT y Comisión de Energéticos (Sepafin).

† También en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN.

so y no a través de una capa metálica con un espesor de 10^{-5} cm.? ¿Por qué no puedo conectar los mecates del tendedero al contacto eléctrico de la sala y hacer que una lámpara que se encuentra en el otro extremo del mecate se encienda, ésto es, por qué existen materiales que conducen mejor la electricidad que otros?, ¿Por qué unos materiales presentan características de imán y otros no?. Estas preguntas estan relacionadas con las propiedades térmicas, mecánicas, ópticas, eléctricas y magnéticas de sólidos. El área de estudio de estas propiedades es lo que se conoce como Física del Estado Sólido. Es necesario advertir que dado lo extenso del tema no será posible dar en este trabajo la respuesta a todas las preguntas anteriores ni cubrir todos los tópicos de la Física del Estado Sólido ni tampoco profundizar en los temas tratados.

Considerando que algunas de las preguntas que nos hemos hecho antes deben ser tan viejas como la humanidad, lo que más sorprende es la juventud de la Física del Estado Sólido. La edad de esta área de la Física es de aproximadamente 50 años. En el pasado la gente estaba preocupada por el entendimiento de los sólidos, pero hubo que esperar el desarrollo de las técnicas experimentales y matemáticas para que estos materiales comenzaran a ser entendidos. En el siglo V a de J.C. el filósofo griego Demócrito ya manejaba la idea de que la materia está compuesta por átomos y que las propiedades de las cosas se producen por composición de estos átomos. En la época de Newton ya había gente que daba explicaciones fenomenológicas de los sólidos en base a corpúsculos que componen la materia. Pero con la entrada de la Matemática de Newton todas estas teorías quedan al margen. Y son hechas a un lado fundamentalmente porque Newton es capaz de predecir científicamente los fenómenos que estudia. A Newton le preocupa la masa y en su teoría no hay posibilidad de analizar la estructura de la misma. En estas condiciones tuvieron que pasar aproximadamente dos siglos para que la gente volviese a hablar sobre la composición atómica de la materia.

Fue una técnica experimental la que desenterró el modelo atómico de los sólidos. En 1912 von Laue descubrió la difracción de rayos X debida a muestras de sólidos monocristalinos; en ese mismo año Bragg explicó los máximos de la difracción en base a un modelo muy simple en el cual se supone que los rayos X son reflejados especularmente por planos atómicos paralelos⁽¹⁾. Este resultado experimental, aunado a la inven-

ción de la Mecánica Cuántica por Schrödinger, Heisenberg y Born, permitió que a partir de 1930 se explicaran un gran número de fenómenos en sólidos que hasta esa época eran parte de la magia. Un buen ejemplo del uso de los conceptos teóricos ofrecidos por la Mecánica Cuántica es el estudio reciente de la absorción de rayos X por algunos sólidos⁽²⁾. El análisis de los resultados es hecho en base al entendimiento de que los electrones fotoemitidos por los rayos X se propagan como ondas en una red atómica periódica. Es importante enfatizar que hasta fines del siglo XIX lo mejor que la gente podía hacer era entender un sólido en términos de arreglos moleculares. La gran diferencia fué entender los sólidos como arreglos atómicos y no más en términos de moléculas o átomos por separado. El avance logrado en el estudio de sólidos mediante rayos X permite en la actualidad localizar las nubes electrónicas de ligaduras interatómicas además de los arreglos atómicos. En nuestra vida diaria nos encontramos con materiales sólidos como la madera, los plásticos, el papel, las telas y los vidrios que no presentan periodicidad atómica. El estudio de estos materiales es reciente en la Física del Estado Sólido y está comprendido en temas denominados materiales amorfos y poliméricos^(3,4).

Dentro de las estructuras de los seres vivos se presentan sólidos con arreglos atómicos periódicos. En el hombre estos sólidos están presentes en el esmalte de los dientes y de los huesos; este material es conocido como apatita. En los erizos de mar estos sólidos también están presentes, su visualización se puede conseguir en una primera etapa mediante un microscopio que use luz polarizada e interferencia diferencial y posteriormente mediante un difractor de rayos X⁽⁵⁾. La estructura que se obtiene es la de la calcita que consiste de planos alternados de iones de calcio y grupos de carbonato.

Fué posible entender la ruptura y la deformación plástica de los metales en base a los arreglos atómicos periódicos⁽⁶⁾. Se puede demostrar termodinámicamente la imposibilidad de que exista en la naturaleza un cristal con arreglo atómico perfecto. Son precisamente las imperfecciones las que dan mayor versatilidad de aplicación a los sólidos. - "Dislocaciones" que pueden entenderse como un plano atómico extra y que han sido observadas en movimiento permiten predecir la fragilidad o ductibilidad de los metales. El movimiento de dislocaciones está asociado

a la destrucción y reconstrucción de enlaces atómicos y es aquí donde es posible satisfacer a los espíritus más pragmáticos sobre la importancia de los enlaces atómicos en la explicación de como doblar un clip.

Algunas propiedades ópticas de sólidos están asociadas a la presencia de vacancias atómicas⁽⁷⁾. La falta de un átomo en un grano de sal común y en general en cualquier material halogenuro alcalino origina un pozo de potencial donde fácilmente puede ser atrapado un electrón. Un electrón atrapado en una vacancia negativa es capaz de absorber luz en la región visible del espectro. Electrones extras pueden ser inyectados a los halogenuros alcalinos mediante la aplicación de un voltaje a los contactos eléctricos preparados convenientemente a la muestra. Esta inyección es hecha a una temperatura mayor que 700°C; en la actualidad se ha descubierto experimentalmente que ciertos materiales pueden ser coloreados a temperatura ambiente⁽⁸⁻¹⁰⁾. Estos sólidos son WO_3 , TiO_2 , MoO_3 y algunos otros. Estos materiales que pueden ser coloreados a temperatura ambiente mediante la aplicación de un campo eléctrico están comprendidos dentro del campo de estudio denominado Electrochromismo. Estos materiales son potencialmente aplicables en la industria de carátulas para aparatos electrónicos digitales.

Desde el punto de vista experimental una de las cosas que la humanidad actual podría presentar con mucho orgullo al propio Leonardo da Vinci es el microscopio electrónico de barrido. A Demócrito se le podría mostrar la posición en que queda un átomo de potasio al difundirse en una matriz de WO_3 formando así un bronce tungstenoso⁽¹¹⁾. La posibilidad de tomar fotografías de átomos constituye un buen ejemplo de creatividad en la investigación experimental de la naturaleza. La primera vez que se observó el movimiento de dislocaciones atómicas fué durante el análisis de películas metálicas delgadas en un microscopio electrónico de transmisión⁽¹²⁾. N. Mott quien recientemente obtuvo el premio Nobel cuenta que una de las emociones más fuertes que ha tenido como investigador fué el día en que uno de sus estudiantes lo llamó para mostrarle como podía observar el movimiento de las dislocaciones⁽¹²⁾. Desde el punto de vista de las aplicaciones este tema es muy importante por ejemplo en la industria automotriz⁽¹³⁾. Ahí es importante conocer el movimiento de las dislocaciones para escoger el material más apropiado en la preparación de carrocerías o para la preparación de anillos usados en automotores. Estos conocimientos son los que hacen que un país

como Japón que es importador de minerales sea gran exportador de productor metálicos manufacturados.

Aún dentro del campo de estudio de los arreglos atómicos podemos hablar de los cristales líquidos⁽¹⁴⁾. Estos son fluídos que tienen ciertas propiedades de cristalinidad. Estos materiales han entrado en nuestra vida cotidiana. Son de uso común en las carátulas digitales de los relojes y de las calculadoras de bolsillo. Estos dispositivos son hechos poniendo el cristal líquido entre dos vidrios planos. Normalmente el líquido cristalino es transparente pero cuando se le aplica un campo eléctrico, algunas regiones de él se hacen turbulentas y dispersan la luz. El efecto del campo eléctrico es el de favorecer la tendencia natural del cristal líquido a adoptar patrones de arreglos moleculares ordenados; las moléculas que componen el cristal líquido se alinean dentro del campo eléctrico en forma semejante a como lo harían pequeños imanes dentro de un campo magnético. Alineadas en este aforma las moléculas presentan una barrera a los iones que se pueden mover dentro del líquido. Los iones perturban el arreglo creando regiones de turbulencia. La turbulencia causa que la película del material que originalmente era transparente tome un aspecto lechoso.

Antes de terminar con el tema de arreglos atómicos es interesante tratar un sólido amorfo. Se dice que un material es amorfo cuando los átomos que lo constituyen están desordenados. El material a tratar es el ópalo⁽¹⁵⁾. Hasta la fecha este sólido no tiene ninguna aplicación tecnológica y su valor es el de una gema. Aquí la Física Experimental ha hecho una contribución importante a la explicación de un problema estético. Cuando estas gemas son expuestas a la luz blanca y se les hace girar se obtienen hermosos haces de luz de diferentes colores provenientes del ópalo. Hasta hace poco tiempo este fenómeno no tenía explicación. El uso del microscopio electrónico permitió que este problema se solucionara. Se encontró la evidencia de estructura periódica en el ópalo. El cuerpo de la gema consiste en partículas esféricas transparentes de sílice amorfo. En los espacios entre las esferas hay una reducción en el índice de refracción, porque los espacios contienen solamente aire, vapor de agua o agua líquida. Estas discontinuidades arregladas regularmente actúan como puntos dispersores de la luz, formando una red de difracción en tres dimensiones.

Dentro del campo de la Física de Sólidos los investigadores no solamente han aprendido a estudiar experimentalmente las propiedades de los sólidos que se encuentran normalmente en la naturaleza sino que también han aprendido a preparar sus propios materiales. Las personas que se dedican al crecimiento de cristales⁽¹⁶⁾ están frecuentemente cerca de la vibración que debieron haber sentido los primeros hombres que le pusieron fuego al barro y lo transformaron en piedra. Esta capacidad divina de creación, ha permitido que las propiedades de los materiales puedan ser diseñadas y no solo seleccionadas. En estas condiciones los arquitectos de los materiales pudieron crear sólidos a voluntad y hacerlos cumplir funciones especificadas bajo pedido. Dispositivos que antes no existían empezaron a aparecer y gran parte de lo que es la Electrónica Moderna tuvo sus orígenes en esta forma.

El desafío que representa el estudio de imperfecciones cristalinas ha sido enfrentado por la Física Experimental en forma altamente loable. Por ejemplo ha sido establecido que si se hace incidir un haz de positrones sobre un sólido halogenuro alcalino, el tiempo de vida medio de los positrones se incrementa sistemáticamente con la concentración de vacancias en el cristal. La metalurgia también se ha servido de la técnica de positrones; el tiempo de vida medio de los positrones cambia cuando hay al menos una vacancia por millón de átomos en el cristal⁽¹⁷⁾. Otras técnicas bastante ingeniosas han sido desarrolladas para el estudio de imperfecciones cristalinas. Entre éstas se encuentra las llamadas Termoluminiscencia y las Corrientes Térmicamente Estimuladas. En ambas técnicas la idea central es la de separar un electrón de un átomo del cristal mediante un fotón; el electrón liberado puede ser capturado por una imperfección y si posteriormente se calienta el cristal, se favorece térmicamente el desatrapamiento del electrón. En estas condiciones el electrón tiene una gran probabilidad de volver a la posición inicial que tenía antes de ser excitado fotónicamente. Cuando el electrón es excitado térmicamente puede contribuir a la conductividad del material, y midiendo la corriente térmicamente estimulada es posible obtener información sobre las imperfecciones⁽¹⁸⁾. Información equivalente se puede obtener también si se mide la luminiscencia que aparece cuando el electrón vuelve a su posición inicial⁽¹⁹⁾.

Hablemos ahora sobre lo que se conoce de la manera en que los átomos se ligan para formar el cristal. Hasta la fecha han sido identificados cinco tipos de uniones entre átomos; éstas son: iónica, covalente, dipolar, metálica e hidrogénica. Todas estas ligaduras son idealizadas, ya que la mayoría de los materiales presenta una combinación de ellas⁽¹⁾. Vamos a escoger un caso donde un tipo de ligadura es dominante y el entendimiento de la misma ayudó a imaginar cómo impurificar en forma controlada el material para ser usado en el desarrollo de un sólido que sirviese como amplificador de señales eléctricas. Esta ligadura se presenta en los materiales que son usados en la construcción de transistores. Estos son llamados semiconductores. Tomemos por ejemplo el silicio; en este caso cada átomo aislado tiene cuatro electrones de valencia que puede compartir con otros átomos. Cuando se juntan para formar el cristal, los átomos quedan unidos entre sí mediante electrones compartidos. Por este razón a este tipo de ligaduras se le llama covalente. La aplicación científica se inició cuando los investigadores se dieron cuenta que si impurificaban el silicio con fósforo por ejemplo, la conductividad del semiconductor aumentaba. El aumento en la conductividad es debido a que el fósforo tiene cinco electrones de valencia y por tanto dentro del cristal de silicio deja un electrón libre que contribuye a la conductividad. Un aumento análogo acontece cuando la impurificación es hecha con átomos de aluminio los cuales tienen tres electrones de valencia. En este caso el aumento en la conductividad se explica diciendo que el hueco electrónico en el aluminio permite el movimiento de electrones que antes no se podían mover. Semiconductores cuya conductividad es hecha mediante electrones son llamados tipo n; semiconductores cuya conductividad es hecha mediante huecos son llamados tipo p. Dentro de la Física Experimental existen métodos para determinar cuando un semiconductor es tipo p o tipo n. Estos métodos son el de efecto Hall y el de la Potencia Termoeléctrica.

El estudio de los semiconductores abrió un campo de aplicaciones muy amplio para la electrónica. Al unir un semiconductor tipo n con un tipo p se crea en la interface un campo eléctrico. Estas uniones p-n son de uso común en la vida cotidiana de casi todos nosotros. Están presentes en los relojes y en las calculadoras electrónicas de bolsillo de uso cada vez más frecuente en gentes de todas las edades. Se habla de

la Electrónica como la revolución que no tocó el timbre e invade cada día más todos los campos de la industrialización. Es difícil creer que algún país se pueda mantener al margen de esta revolución. Se dice también que ésta es la industria del siglo XX cuando se le compara con otras como la industria de la aviación, automotriz o la del hierro⁽²⁰⁾. Actualmente se fabrican circuitos integrados donde resistencias y condensadores son preparados totalmente en forma sólida⁽²¹⁻²³⁾. Ya no es necesario andar dando vueltas a alambritos para preparar componentes electrónicos.

Trabajando conjuntamente físicos e ingenieros en electrónica, ha sido posible desarrollar láseres sólidos⁽²⁴⁾. Las uniones p-n pueden ser controladas eléctricamente y a voluntad se puede obtener luz coherente en la región de la unión. Hoy en día es posible coleccionar esta luz en tubos formados por fibras ópticas⁽²⁵⁾ y usar estos sistemas para enviar información. Actualmente, están en experimento centrales telefónicas con comunicación óptica en la Ciudad de Campinas en Brasil y en la Ciudad de Chicago en Estados Unidos de América. La ventaja fundamental de estos sistemas es que se puede enviar más información que con los sistemas convencionales.

Otro campo de aplicación donde la Física está haciendo contribuciones importantes es en el estudio de la conversión fotovoltaica de energía solar⁽²⁶⁾. En este caso se hace uso del campo eléctrico intrínseco de la unión p-n. Cuando la región de la unión es iluminada por la luz del sol, se excitan electrones dentro del sólido que pueden ser transportados por el campo eléctrico presente. Se obtiene así una corriente eléctrica que puede ser colectada mediante un circuito externo conectado convenientemente. En la actualidad se investigan en la Universidad Autónoma de Puebla y en el Instituto Politécnico Nacional otro tipo de celdas solares que usan interfaces metal-semiconductor y electrolito-semiconductor^(27,28). En estas interfaces se tiene también un campo eléctrico intrínseco que actúa en la misma forma que en las uniones p-n. El objetivo fundamental en estas investigaciones es el de producir celdas solares más económicas que las actuales, de tal forma que puedan ser competitivas con los sistemas de conversión de energía convencionales.

Se ha intentado a lo largo de este trabajo mostrar algunos tópicos de la Física Experimental, resaltar la forma creativa en que los físicos

han contribuido al estudio de los sólidos y cómo se han hecho algunas aplicaciones de la Ciencia. Conocemos algunas cosas que deberán hacerse dentro del campo de investigación de la Física del Estado Sólido, pero lo que resta por hacerse depende fundamentalmente de la motivación, interés y creatividad de las nuevas generaciones.

REFERENCIAS

1. C.S. Smith, *Scientific American* 217 (1967) 69.
2. E.A. Stern, *Scientific American* 234 (1976) 96.
3. D. Adler, *Scientific American* 236 (1977) 36.
4. H.F. Mark, *Scientific American* 217 (1967) 148.
5. S. Inoué and K. Okazaki, *Scientific American* 236 (1977) 82.
6. A.H. Cotrell, *Scientific American* 217 (1967) 90.
7. A. Javan, *Scientific American* 217 (1967) 238.
8. B.W. Faughnan, R.S. Crandall, and P. M. Heyman, *RCA Review* 36 (1975) 177.
9. M. Green, W.C. Smith, and J.A. Weiner, *Thin Solid Films* 36 (1976) 89.
10. J. González H., J. González Basurto, F. Sánchez Sinencio, J.S. Helman, and A. Reyes Flotte, *J. Appl. Phys.* 49 (1978) 4509.
11. J.M. Cowley and S. Iijima, *Phys. Today* 30 (1977) 32.
12. N. Mott, *Scientific American* 217 (1967) 80.
13. S.S. Hecker and A.K. Ghosh, *Scientific American* 235 (1976) 100.
14. G.H. Heilmeyer, *Scientific American* 222 (1970) 100.
15. P.J. Darragh, A.J. Gaskin and J.V. Sanders, *Scientific American* 234 (1976) 84.
16. M.C. Flemings, *Scientific American* 231 (1974) 88.
17. W. Brandt, *Scientific American* 233 (1975) 34.
18. F. Sánchez Sinencio, S. Mascarenhas, and B.S.H. Royce, *Phys. Letters* 26A (1967) 70.
19. A.G. Milnes, Deep Impurities in Semiconductors (Wiley, N.Y., 1973), Ch. 9.
20. D. Bell, *Phys. Today* 31 (1978) 88.
21. W.G. Oldham, *Scientific American* 237 (1977) 110.
22. E.W. McWhorter, *Scientific American* 234 (1976) 88.
23. W.C. Hittinger, *Scientific American* 229 (1973) 48.
24. S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices (Wiley-Interscience, 1969), Ch. 13.
25. J.S. Cook, *Scientific American* 229 (1973) 28.
26. B. Chalmers, *Scientific American* 235 (1976) 34.
27. C. Menezes, F. Sánchez Sinencio, J.S. Helman, R. Williams, and J. Dresner, *Appl. Phys. Letters* 31 (1977) 16.
28. C. Vázquez López, F. Sánchez Sinencio, J.S. Helman, J.L. Peña, A. Lastras Martínez, P.M. Racciah and R. Triboulet, *J. Appl. Phys.* 50 (1979) 5391.