

INTRODUCCION

Los superconductores forman parte importante en la era moderna, ya que permiten ampliar la capacidad de los nuevos instrumentos tecnológicos que muchas veces eran insuficientes para la realización de algunas tareas en la industria. A continuación se muestra una breve investigación por dicha tecnología.

SUPECONDUCTIVIDAD: Fenómeno que presentan algunos conductores que no ofrecen resistencia al flujo de corriente eléctrica. Los superconductores también presentan un acusado diamagnetismo, es decir, son repelidos por los campos magnéticos. La superconductividad sólo se manifiesta por debajo de una determinada temperatura crítica T_c y un campo magnético crítico H_c , que dependen del material utilizado. Antes de 1986, el valor más elevado de T_c que se conocía era de 23,2 K ($-249,95^\circ\text{C}$), en determinados compuestos de niobio-germanio. Para alcanzar temperaturas tan bajas se empleaba helio líquido, un refrigerante caro y poco eficaz. La necesidad de temperaturas tan reducidas limita mucho la eficiencia global de una máquina con elementos superconductores, por lo que no se consideraba práctico el funcionamiento a gran escala de estas máquinas. Sin embargo, en 1986, los descubrimientos llevados a cabo en varias universidades y centros de investigación comenzaron a cambiar radicalmente la situación. Se descubrió que algunos compuestos cerámicos de óxidos metálicos que contenían lantánidos eran superconductores a temperaturas suficientemente elevadas como para poder usar nitrógeno líquido como refrigerante. Como el nitrógeno líquido, cuya temperatura es de 77 K (-196°C), enfría con una eficacia 20 veces mayor que el helio líquido y un precio 10 veces menor, muchas aplicaciones potenciales empezaron a parecer económicamente viables. En 1987 se reveló que la fórmula de uno de estos compuestos superconductores, con una T_c de 94 K (-179°C), era $(Y_{0,6}Ba_{0,4})_2CuO_4$. Desde entonces se ha demostrado que los lantánidos no son un componente esencial, ya que en 1988 se descubrió un óxido de cobre y talio-bario-calcio con una T_c de 125 K (-148°C). Véase también Criogenia.

La superconductividad fue descubierta en 1911 por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes, que observó que el mercurio no presentaba resistencia eléctrica por debajo de 4,2 K (-269°C). El fenómeno no se empezó a entender hasta que, en 1933, los alemanes Karl W. Meissner y R. Ochsenfeld detectaron un acusado diamagnetismo en un superconductor. Sin embargo, los principios físicos de la superconductividad no se comprendieron hasta 1957, cuando los físicos estadounidenses John Bardeen, Leon N. Cooper y John R. Schrieffer propusieron una teoría que ahora se conoce como teoría BCS por las iniciales de sus apellidos, y por la que sus autores recibieron el Premio Nobel de Física en 1972. La teoría BCS describe la superconductividad como un fenómeno cuántico, en el que los electrones de conducción se desplazan en pares, que no muestran resistencia eléctrica. Esta teoría explicaba satisfactoriamente la superconducción a altas temperaturas en los metales, pero no en los materiales cerámicos. En 1962, el físico británico Brian Josephson estudió la naturaleza cuántica de la superconductividad y predijo la existencia de oscilaciones en la corriente eléctrica que fluye a través de dos superconductores separados por una delgada capa aislante en un campo eléctrico o magnético. Este fenómeno, conocido como efecto Josephson, fue posteriormente confirmado experimentalmente.

APLICACIONES

Por su ausencia de resistencia, los superconductores se han utilizado para fabricar electroimanes que generan campos magnéticos intensos sin pérdidas de energía. Los imanes superconductores se han utilizado en estudios de materiales y en la construcción de potentes aceleradores de partículas. Aprovechando los efectos cuánticos de la superconductividad se han desarrollado dispositivos que miden la corriente eléctrica, la tensión y el campo magnético con una sensibilidad sin precedentes.

El descubrimiento de mejores compuestos semiconductores es un paso significativo hacia una gama mayor de aplicaciones, entre ellas computadoras más rápidas y con mayor capacidad de memoria, reactores de fusión nuclear en los que el plasma se mantenga confinado por campos magnéticos, trenes de levitación magnética

de alta velocidad y, tal vez lo más importante, una generación y transmisión más eficiente de la energía eléctrica. El Premio Nobel de Física de 1987 se concedió al físico alemán J. Georg Bednorz y al físico suizo K. Alex Mueller por su trabajo sobre la superconductividad a altas temperaturas.

SUPERCONDUCTORES DE ALTA T_c , DIEZ AÑOS DESPUÉS

Esta contribución es una somera revisión del estado actual del conocimiento, acumulado durante casi diez años de investigación, de los superconductores de alta temperatura crítica. Inicialmente se resaltan algunas características comunes de estos nuevos materiales, se discuten algunos de los problemas más relevantes que limitan sus aplicaciones y finalmente se describen aspectos de la problemática relacionada con la determinación de las interacciones fundamentales responsables de la superconductividad de alta T_c .

Un superconductor tiene dos características esenciales. Por debajo de una temperatura crítica característica (T_c), dependiente de la naturaleza y estructura del material, los superconductores exhiben resistencia cero al flujo de electricidad y pueden expulsar el flujo magnético de su interior, dando lugar al fenómeno de levitación magnética.

El primer superconductor, mercurio, descubierto en 1911 por G. Holst y K. Onnes, sólo lo era a temperaturas inferiores a 4.2 K y a principios de 1986 el récord de temperatura crítica estaba en 23 K correspondiente al compuesto Nb_3Ge . La ruta de crecimiento había sido de 0.3 grados por año y los superconductores a temperatura ambiente parecían inalcanzables. A finales de 1986 la comunidad científica internacional fue sorprendida cuando J. G. Bednorz y K. A. Müller, del centro de investigaciones de la IBM en Zurich, observaron una $T_c \sim 35$ K en el compuesto de óxido de Cobre, Bario y Lantano ($BaLaCuO$) sintetizado con anterioridad por el grupo de B. Raveau y C. Michel en Francia. La euforia desatada por este descubrimiento condujo a que poco tiempo después, se descubriera que la T_c podía seguir subiendo lo que llevó al descubrimiento de nuevos materiales superconductores, con T_c por encima del punto de ebullición del nitrógeno líquido (~ 77 K). Se despertaron entonces atrevidas esperanzas que fueron sofocadas relativamente pronto por varias dificultades tanto en el plano teórico, donde los conocimientos acumulados sobre el estado superconductor hasta 1986 fueron incapaces de describir la superconductividad de alta T_c , como en lo referente a las aplicaciones, puesto que el estado superconductor se destruye al ser sometido a un campo magnético, cosa que debe hacerse en muchas de las aplicaciones concebibles.

Diez años después, cuando la euforia inicial ha cedido y las noticias de éxitos sensacionalistas se han vuelto escasas, muchas ideas novedosas relativas a las características de los nuevos cupratos superconductores se han decantado elevando significativamente el nivel del conocimiento, y a pesar de las dificultades anotadas anteriormente estos cupratos se utilizan ya en la microelectrónica, por ejemplo como sensores de campo magnético (SQUID: interferómetro cuántico superconductor), filtros, resonadores etc.

Características comunes

Todos estos nuevos superconductores a base de Cobre, pertenecen a la familia de las perovskitas, es decir, están formados por cristales constituidos por el apilamiento en todas las direcciones del espacio, de octaedros que contienen en su centro un átomo metálico, el cobre, con átomos de oxígeno en los vértices y otro átomo metálico ocupando los espacios entre los octaedros. Esta estructura cristalina, conduce a la formación de planos CuO_2 , responsables de las propiedades electrónicas de los superconductores de alta temperatura crítica (HTS). Los demás átomos contribuyen al balance de carga y a la estabilidad de la estructura.

Los estados electrónicos, cerca de la energía de Fermi están formados por orbitales $Cu-3d$ y $O-2p$, los cuales dan lugar a bandas híbridas con un carácter marcadamente cuasibidimensional. El carácter bidimensional de los electrones de conducción se refleja en parte en la extrema anisotropía de las propiedades físicas. La resistividad en la dirección $c(r)$ por ejemplo, llega a ser ~ 105 veces mayor que la correspondiente en el plano $ab(r)$. Adicionalmente, el comportamiento con la temperatura de r y r es esencialmente diferente: mientras r

decrece al disminuir la temperatura (comportamiento metálico), r aumenta al disminuir la temperatura (comportamiento semiconductor).

Por otra parte, a cada HTS conocido le corresponde un compuesto o "sistema de referencia" el cual, aunque difiere levemente en composición, se diferencia sustancialmente en sus propiedades físicas. Mientras los HTS son metálicos paramagnéticos y para $T < T_c$ superconductores, los sistemas de referencia se comportan como semiconductores y, antiferromagnéticos y para $T = 0$ completamente aislantes.

Aunque el entendimiento microscópico de este diagrama de fases no es todavía completo, parece existir consenso respecto a las causas del antiferromagnetismo y de la transición metal-aislante. Tales efectos estarían relacionados con una fuerte correlación electrónica, cerca de la energía de Fermi: la banda híbrida semillena $Cu-3d-O-2p$ se desdobra por efectos de correlación en dos bandas llenas (bandas d y p) y una banda d desocupada, dando lugar al comportamiento aislante. Mediante dopaje p o n , por ejemplo, al reemplazar La^{3+} por Sr^{2+} , el compuesto se convierte en metálico y para un adecuado valor (x, T) , en superconductor. Vale la pena resaltar que el sistema de referencia puede también hacerse metálico y superconductor adicionando electrones a la banda superior d , originalmente vacía. Tal efecto se observó por primera vez en el compuesto $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$ (superconductor tipo n , con una $T_c \sim 25$ K) [4].

Aunque en forma un tanto arbitraria, los superconductores de alta T_c conocidos hoy en día con $T_c > 35$ K, han sido clasificados en tres clases:

A la primera clase pertenecen los compuestos del tipo $(La-Sr)_2CuO_4$ (214) caracterizados por un único plano CuO_2 y $T_c \sim 30$ K. Prototipo de la segunda clase es el compuesto $YBa_2Cu_3O_7$ (123) descubierto por Chu y colaboradores (1987), con una $T_c \sim 95$ K y dos planos de CuO_2 . Representantes de la tercera clase son los compuestos de $Bi_2Sr_2Ca_nCu_{1+n}O_{6+2n}$ ($n = 0, 1, 2$), es decir, compuestos del tipo Bi_{2201} , Bi_{2212} y Bi_{2223} con $T_c \sim 20$ K, 85 K y 110 K respectivamente descubiertos por Maeda en 1988; los compuestos estructuralmente casi idénticos de $Tl_2Ba_2Ca_nCu_{1+n}O_{6+2n}$ ($n = 0, 1, 2$) con $T_c \sim 125$ K (Tl_{2223}) descubiertos por Hermann y colaboradores en 1988 y los compuestos de la serie homóloga del Mercurio $HgBa_2Ca_n-1Cu_nO_{2n+2+d}$ ($n = 1-4$) descubiertos en 1993 por Schilling-Ott, con el récord de temperatura crítica $T_c \sim 136$ K (1223). Como se observa, incrementando el número de planos de cobre se incrementa la T_c . Este comportamiento, válido hasta $n = 3$, llevó a la conclusión: "más planos adyacentes de CuO_2 producen mayor T_c ", pero la idea de fabricar compuestos superconductores con más planos de cobre resultó sorprendentemente difícil ya que las estructuras se tornaban inestables.

Sin embargo, el resultado de continuar la investigación alrededor de esta idea condujo a que en 1993 el francés M. Laguerre y su equipo de investigación, usando el método de epitaxia molecular por secuencia impuesta de capas atómicas, lograra producir materiales en forma de películas delgadas con temperaturas críticas alrededor de 250 K. Las películas producidas por este método pertenecen a la familia denominada "fase infinita", cuya estructura cristalina es una alternancia de dos planos atómicos: un plano de óxido de Cobre (CuO_2) responsable de la superconductividad y un plano agregado cuya función principal es imponer al plano de Cobre una estructura cristalina y una carga eléctrica susceptible de volverlo superconductor.

Aspectos de las aplicaciones.

La atmósfera en el mundo de la superconductividad ha cambiado bastante en el último tiempo, en virtud no sólo de la complejidad para producir los nuevos materiales superconductores sino por sus características técnicas que los hacen inferiores en todo caso a los superconductores convencionales.

En especial, vale la pena mencionar dos dificultades inherentes a los nuevos superconductores cerámicos, que limitan en alto grado el flujo de corriente transportada y por ende sus aplicaciones: la existencia de uniones débiles entre granos y el movimiento de vórtices.

Recordemos que los nuevos materiales superconductores son ante todo cerámicos, es decir, la fragilidad es una de sus características, lo que hace especialmente difícil su utilización en la fabricación de alambres y circuitos eléctricos. Adicionalmente, ellos son de naturaleza granular, lo que da lugar al fenómeno denominado de uniones débiles entre granos superconductores que dificulta el paso de corriente de un grano a otro por no estar éstos siempre acoplados de manera apropiada; es así como cualquier defecto de alineación, aún de unos pocos grados, inhibe el flujo de corriente sin resistencia reduciendo la cantidad de corriente transportada en dos o más órdenes de magnitud. Los esfuerzos por superar dichas dificultades han llevado a los investigadores en el campo a seguir diversos caminos que, si bien no solucionan del todo los problemas existentes, permiten bordearlos y abren perspectivas para la utilización de los nuevos materiales.

Los problemas debidos a la existencia de uniones débiles y movimiento de vórtices son bastante apreciables en las aplicaciones de las cerámicas superconductoras en bloque, es decir, en usos como alambres para motores, bobinas, líneas de transmisión, etc. sin embargo, estas dificultades son menos dramáticas en las aplicaciones de los nuevos materiales en forma de películas delgadas, utilizadas específicamente en el campo de la microelectrónica y en técnicas que utilizan microondas. Películas delgadas fabricadas con Itrio (YBCO), por ejemplo, pueden conducir corrientes entre 106 y 107 A/cm²; esto es posible porque en películas delgadas las uniones débiles no son un serio impedimento ya que los granos pueden alinearse con el sustrato sobre el que crece la película. Tales muestras epitaxiales son, además, pequeñas en comparación con el material en bloque de tal manera que existen relativamente pocas fronteras de grano que impidan el flujo de corriente. En general, se ha encontrado que las películas superconductoras con alto grado de textura y epitaxiales, reducen o anulan completamente la influencia de las uniones débiles, lo que permite un mejor aprovechamiento de la capacidad intrínseca de transporte de corriente de los granos superconductores.

Un reto aún más difícil de resolver proviene del movimiento de los vórtices producidos por la aplicación de un campo magnético suficientemente intenso; este movimiento es el causante de fenómenos de disipación y del comportamiento resistivo presente en los HTS. Veámoslo en más detalle; en los años cincuenta A. Abrikosov publicó la teoría básica del comportamiento de los superconductores convencionales de tipo II en un campo magnético. La respuesta magnética de un superconductor de tipo II por debajo de T_c depende de la intensidad del campo magnético aplicado y de la temperatura.

Un campo magnético suficientemente intenso puede penetrar el superconductor en forma de haces discretos de líneas de flujo magnético denominados vórtices. Ahora bien, los HTS desafortunadamente no se comportan según el modelo de Abrikosov. Sometidos a campos magnéticos de unos 10 T, la resistencia de algunos de estos nuevos materiales sólo disminuyó hasta que su temperatura descendió al 20 o 30% de la T_c . En ciertos casos la resistencia en presencia de un campo magnético, en algunos materiales, se mantuvo 100 veces mayor que la del cobre. La razón parece ser que las líneas de vórtice se comportan de manera inusual y no siempre se organizan en una red triangular rígida. Se halló que la red de vórtices se "funde" como consecuencia de las fluctuaciones térmicas de las líneas de vórtice, creándose un estado adicional parecido al líquido: el líquido de vórtices. (el fenómeno es similar al de la fusión del hielo a causa de las vibraciones térmicas de las moléculas de agua). Un estado tal, permite el movimiento de los vórtices por todo el material impidiendo el flujo de corriente.

El comportamiento del estado líquido de vórtices continúa siendo hoy en día un interrogante; en lo que parece existir consenso es en que hay una variedad de razones por las cuales este nuevo estado de la materia debe obstaculizar el paso de corriente en los superconductores de alta temperatura. Recordemos que una línea de vórtice consiste en corrientes eléctricas que circulan alrededor de un núcleo normal. Cuando una corriente eléctrica adicional fluye por la muestra, se suma a la corriente que circula a un lado del vórtice y se resta de la corriente del lado opuesto, resultando una fuerza que tiende a mover el vórtice en una dirección simultáneamente perpendicular a la línea de vórtice y a la de la corriente aplicada. Si las líneas de vórtice se mueven en respuesta a esta fuerza, disiparán energía de la corriente, es decir, se induce un voltaje en la muestra y, por tanto, resistencia. En los superconductores convencionales de tipo II, caracterizados por una longitud de coherencia larga y una longitud de penetración corta, la fuerza que impide que las líneas de

vórtice vibren con amplitud cada vez mayor (fuerza restauradora) es dominante y mantiene las líneas de vórtice rectas y cortas impidiendo que vibren con amplitud cada vez mayor al aumentar la temperatura, por efecto de las fluctuaciones térmicas. Los HTS por el contrario, tienen características prácticamente opuestas: la longitud de coherencia es corta y la de penetración es larga, es decir, una fuerza recuperadora pequeña, lo que conduce a que las líneas de vórtice sufran grandes fluctuaciones térmicas. En efecto, a temperaturas elevadas las líneas vibran tanto que la red de vórtices se funde presentándose el estado líquido de vórtices. Por desgracia, la temperatura de "fusión" en los óxidos de cobre está por debajo de la temperatura del nitrógeno líquido. Investigaciones de la resistencia en función de la temperatura, realizadas en muestras de YBCO sometidas a un campo magnético, indican que a altas temperaturas (en la fase de líquido de vórtices) la resistencia es alta y desaparece al bajar la temperatura, cuando el líquido de vórtices se congela y entra al estado reticular de vórtices en donde las líneas ya no tienen libertad de movimiento.

Ahora bien, quienes trabajan con superconductores convencionales introducen en éstos defectos de manera controlada, pues cuanto más "sucio" sea un superconductor más corriente puede transportar. Tales impurezas "anclan" los vórtices e impiden que se muevan. En consecuencia, existe la posibilidad de introducir anclajes del flujo magnético, teniendo en cuenta que los mejores son aquellos que se ajustan al tamaño de la longitud de coherencia. Observaciones recientes han demostrado, además, la importancia del desorden, producido por el anclaje, en la modificación de la dinámica de la transición de fusión. El líquido de vórtices de un cristal desordenado se condensa en un estado de vidrio de vórtices, caracterizado por una distribución irregular y desordenada de vórtices, en vez de hacerlo en una red regular de vórtices; en consecuencia, la resistencia y las corrientes en el material disminuyen regularmente hasta cero, a medida que la temperatura se va acercando a la temperatura de congelación del líquido. En cristales limpios, por el contrario, la transición de fase es brusca y presenta histéresis. Queda pendiente aún, naturalmente, el reto de traducir este nuevo conocimiento en aplicaciones prácticas, es decir, conocer cómo se mueven y organizan estos vórtices a distintas temperaturas y en campos magnéticos diversos para controlar de esta manera el fenómeno y mantener el flujo superconductor.

BIBLIOGRAFIA

Holguín E 1993 Fenomenología y Problemas Actuales de los Superconductores Calientes Comunicación privada.

Giraldo J 1995 "Algunos Problemas Conceptuales Y Metodologicos La Superconductividad De Alta Temperatura Critica" Momento No 9 64–78

Kirtley J R y Tsuei C C Octubre 1996 "Superconductividad a Altas Temperaturas" Investigación y Ciencia No241 48–53

La nueva era de los superconductores

Se aplican el diagnóstico por la imagen

Las bases científicas de la investigación en electromedicina experimentarán un cambio profundo en los próximos años. Lo que hoy conocemos como electrónica convencional será sustituida paulatinamente por la "electrónica superconductora". La superconductividad es una propiedad de la materia que consiste en la pérdida súbita de su resistencia eléctrica al mismo tiempo que expulsa completamente el campo magnético de su interior. La primera aplicación práctica en clínica de los superconductores surgió ante la necesidad de generar campos magnéticos elevados para la espectroscopia de resonancia magnética nuclear.

Las imágenes diagnósticas por resonancia magnética han sido el primer producto que se ha beneficiado de la aplicabilidad de los sistemas superconductores. Para lograr las imágenes de alta resolución en estos sistemas

se utilizan bobinas superconductoras que generan intensos campos magnéticos. Es común que sean esenciales en cualquier sistema de diagnóstico por la imagen o de videocirugía.

Una de las innovaciones que se anuncian como más revolucionarias para los próximos años son los circuitos activos superconductores. Estos se basan en la capacidad de fabricar e integrar uniones Josephson en un circuito electrónico.

Sensibles

Los primeros dispositivos desarrollados con los superconductores de alta temperatura son los sensores magnéticos Squid (Superconducting Quantum Interference Device).

Ofrecen gran sensibilidad para detectar campos magnéticos.

Han comenzado a introducirse con los denominados magnetocardiogramas y magnetoencefalogramas. Se utilizan en las exploraciones funcionales de la actividad cerebral en pacientes con epilepsia, entre otras indicaciones terapéuticas clínicas.

La investigación en electrónica superconductora traerá consigo el desarrollo de ordenadores basados en la lógica RSFQ (Rapid Single Flux Quantum). Con velocidades de 300 gigahertzios, se calcula que en el plazo de diez años esta tecnología informática "irrumperá permitiendo agilizar todos los procesos diagnósticos y terapéuticos basados en sistemas informáticos", según explica Josep Fontcuberta, investigador del Departamento de Materiales Magnéticos y Superconductores de la Universidad Politécnica de Cataluña.

La evolución de la investigación médica en superconductores se orienta por el momento hacia áreas como la generación de campos magnéticos: "El objetivo es lograr el máximo campo magnético posible al mínimo coste, lo que no se podría conseguir a través de un material como el filamento de cobre",

Menos grados

Los superconductores de baja temperatura conocidos trabajan a 270 grados centígrados bajo cero, precisando depósitos de helio líquido. Ahora se trata de utilizar superconductores de alta temperatura, materiales que adquieren propiedades superconductoras a temperaturas por encima de los 90 grados Kelvin, unos 183 grados centígrados bajo cero. Se trabaja en el perfeccionamiento de los sensores Squid para la exploración de la actividad cardíaca más complicada como la fetal y la exploración cerebral que precisa gran sensibilidad. Los Squid permitirán trabajar a temperaturas inferiores a doscientos grados bajo cero y se reducirá el coste económico.

Precisamente, el Institute of Thin Film Ion Technology (ISI) de Alemania ha presentado un modelo de magnetocardiógrafo en la IV Conferencia Europea de Superconductividad Aplicada, celebrado recientemente en Barcelona.

Siemens AG Corporate Technology se ha traducido en el diseño de un procedimiento de imagen de resonancia magnética basado en sistemas superconductores con sensibilidad de alta temperatura tipo Squid. La norteamericana Everson Electric Company se encuentra inmersa en la carrera por lograr el mejor rendimiento en las plataformas criogénicas que se instalan en los servicios hospitalarios. Otra compañía alemana, AWT Werkzeugtechnik, ha lanzado al mercado un agregado criogénico útil para la refrigeración de placas de radiación en tomografía computerizada. También la empresa española Diopma se dedica a la fabricación de un nuevo superconductor diferente del tradicional óxido de cobre. El uso generalizado de superconductores en la distribución de energía podría reducir el consumo de ésta hasta un 20 por ciento, según estimaciones del ISIS.

CONCLUSIONES

Este trabajo contiene algunos avances e investigaciones de los superconductores, así como la importancia y usos que estos van adquiriendo con las nuevas tecnologías que se desarrollan.