

75
204



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTADO DEL ARTE DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a

MARIA JAQUELINA LOPEZ BARRIENTOS



México, D. F.

1989

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION	1	
CAPITULO I	HISTORIA DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD	
I.1	PROPIEDADES QUE DEFINEN A UN SUPERCONDUCTOR	4
I.2	EL INICIO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD	6
I.3	SUPERCONDUCTIVIDAD A ALTA TEMPERATURA	8
CAPITULO II	CARACTERISTICAS DE UN SUPERCONDUCTOR	
II.1	RESISTENCIA NULA	11
II.2	LA TEORIA BCS	13
II.3	DIAMAGNETISMO PERFECTO	15
II.3.1	PROFUNDIDAD DE PENETRACION	20
CAPITULO III	VARIABLES CRITICAS	
III.1	CAMPO MAGNETICO CRITICO (H_c)	22
III.2	CORRIENTE CRITICA (I_c)	24
III.3	TRIUNVIRATO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD	30

CAPITULO IV	ESTRUCTURA INTERNA DE LOS SUPERCONDUCTORES	
IV.1	PEROVSKITAS	34
IV.2	PEROVSKITAS DEFECTUOSAS	38
IV.3	PLANOS Y CADENAS	39
IV.4	LA IMPORTANCIA DEL OXIGENO	42
IV.5	INVESTIGACIONES RECIENTES SOBRE OXIGENO, PLANOS Y CADENAS	44
CAPITULO V	APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD	
V.1	CLASIFICACION DE LAS APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD	46
V.2	EFFECTO JOSEPHSON	47
V.2.1	SQUID	49
V.3	GRUPO 1 ELECTROIMANES Y MAGNETOMETROS SUPERCONDUCTORES	50
V.4	GRUPO 2 CABLES SUPERCONDUCTORES	53
V.5	GRUPO 3 APLICACIONES EN ELECTRONICA	54
V.6	CARACTERISTICAS QUE DEBEN CUMPLIR LOS SUPERCONDUCTORES COMERCIALES	56
V.7	ESTADO DEL ARTE EN LA INVESTIGACION DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD	57
CONCLUSIONES		71
BIBLIOGRAFIA		72

INTRODUCCION

La superconducción es desde luego uno de los hallazgos más fascinantes y sorprendentes de la ciencia de nuestro siglo, y forma parte de los descubrimientos de la física que son capaces de cambiar la forma de vida de la humanidad.

La superconductividad tiene una infinidad de usos en una multitud de áreas, y dentro de la Ingeniería hay aplicaciones sumamente prometedoras debido a:

- a) La posibilidad de transmitir o almacenar grandes cantidades de energía prácticamente sin pérdidas.
- b) La factibilidad de desarrollar circuitos de conmutación más rápidos, más eficientes, más estables.
- c) La posibilidad de desarrollar componentes y transductores de máxima resolución.

Naturalmente, esta disciplina requiere de un profundo conocimiento de los fenómenos físicos como de las teorías del electrón y electromagnética; para lo cual es necesario recordar que la corriente eléctrica se transporta a través de conductores y los responsables de esta función física son de hecho los electrones; pero estos se encuentran con obstáculos a lo largo de su recorrido con los que a cada paso chocan ocasionando con esto, una resistencia al paso de la corriente. Los obstáculos a los cuales se hace referencia, son en su mayoría iones que se encuentran vibrando debido a la temperatura, que entre más alta es ésta, mayor es la vibración de los iones y por consiguiente mayor la resistencia al paso de la corriente eléctrica.

Así, a principios de siglo los científicos de aquel entonces se preguntaban: ¿cómo poder disminuir la resistencia de un material? ; si el obstáculo al paso de los electrones son los choques con los iones que se agitan con el calor, entonces la respuesta fue: bajar la temperatura (premisa que con el tiempo se confirmó).

De esta manera en 1911 H. Kamerlingh Onnes encontró que a una temperatura de 4.2K el mercurio perdía totalmente su resistencia eléctrica, presentando con ello un nuevo estado del material en el que las propiedades eléctricas y magnéticas son completamente distintas a las conocidas a temperatura ambiente.

De esta forma, a la temperatura en la que se pierde toda resistencia se le dió el nombre de temperatura crítica de transición y al nuevo estado en el que fluye mejor la corriente eléctrica debido a que no encuentra resistencia alguna a su paso se le denominó estado de superconducción, llamado comunmente superconductividad.

Por consiguiente, superconductividad es el nombre dado a una remarcada combinación de propiedades eléctricas y magnéticas que aparecen en ciertos elementos cuando estos son llevados a temperaturas sumamente bajas; las propiedades a las cuales nos referimos son:

- 1) Resistencia nula: esto significa que se puede transmitir corriente sin pérdidas.
- 2) Diamagnetismo perfecto: es una propiedad de los materiales superconductores la cual no permite que campos magnéticos penetren al interior del material.

Desde el descubrimiento de la superconductividad, los investigadores se dedicaron a tratar de encontrar materiales superconductores con altas temperaturas críticas de transición; sin embargo pasaron muchos años buscando sin obtener la tan ansiada superconductividad a alta temperatura, hasta que en 1987 Bednorz y Müller encontraron materiales superconductores cuyas temperaturas críticas se acercan a los 100K; los materiales que muestran este comportamiento se encuentran sorpresivamente en el grupo de las cerámicas, las cuales fueron consideradas tradicionalmente como malos conductores eléctricos, de ahí que por varias décadas la búsqueda de nuevos materiales superconductores se concentró en los materiales metálicos e incluso orgánicos, sin considerar a las cerámicas como probables superconductores.

Sobre estos materiales se realizan actualmente estudios exhaustivos en todo el mundo, con las más diversas técnicas experimentales, con el afán de poder encontrar los materiales superconductores capaces de trabajar a temperatura ambiente, así como el poder comprender ampliamente el fenómeno físico que hace posible la superconductividad.

Este trabajo de investigación ha sido realizado con el objeto de dar a conocer a la comunidad el fenómeno de la superconductividad desde sus inicios, su desarrollo histórico, las principales características que lo definen tanto macroscópicas como microscópicas, hasta sus limitaciones y perspectivas hacia el futuro, así como las investigaciones que se están desarrollando a nivel mundial y las posibles aplicaciones de la superconductividad en una multitud de áreas tanto industriales como científicas. Principalmente orientadas al campo de la Ingeniería eléctrica y electrónica más que a su propia combinación estequiométrica y manufactura.

C A P I T U L O I

HISTORIA DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

I.1 PROPIEDADES QUE DEFINEN A UN SUPERCONDUCTOR.

La superconductividad siempre ha sido un fenómeno relacionado con muy bajas temperaturas. Por esta razón, su descubrimiento estuvo muy ligado a la capacidad para obtener temperaturas menores a 1 K. En la Universidad de Leyden-Holanda, en 1908 se logró por primera vez licuar el helio (He) y con ello se dió la posibilidad de llegar a temperaturas del orden de los 4K.

Una vez dominada esta técnica se hicieron múltiples experimentos para determinar el cambio de la resistividad eléctrica de un metal al disminuir la temperatura. De ellos se encontró que ésta es proporcional a la temperatura absoluta. Sin embargo a temperaturas muy bajas existía una resistencia residual provocada por las impurezas en el material, esto sugería realizar mediciones con materiales cada vez más puros, siendo el mercurio (Hg) en ese entonces el material que podía obtenerse con mayor pureza, de esta forma en 1911 se realizaron medidas de resistencia eléctrica contra temperatura, encontrando con esto que a una temperatura de 4.2K caía súbitamente y desaparecía la resistencia eléctrica. Así, la existencia de un estado de conductividad infinita es uno de los dos comportamientos con los cuales se caracteriza al estado superconductor. La temperatura a la cual el material deja de ser conductor para volverse superconductor, se denomina temperatura crítica de transición comúnmente abreviada T_c . Claro está que dicha temperatura es una característica de cada material, esto se puede apreciar en la tabla I donde se presentan las temperaturas críticas para los elementos puros.

En la tabla I se puede observar que no todos los buenos conductores son superconductores, sin embargo, la superconductividad no es un fenómeno raro de la naturaleza ya que cerca de la mitad de los metales son superconductores a presión ambiente y muchas aleaciones también lo son sin importar que los aleantes sean o no superconductores. Por mucho tiempo se creyó que las T_c de los superconductores debían ser inherentemente bajas, limitando así las ideas de las posibles aplicaciones que pueden hacerse con los superconductores. En la actualidad se han descubierto nuevos materiales cuyas T_c 's son cada vez más elevadas, lo cual hace pensar en una mayor influencia de la superconductividad en la tecnología.

En la tabla II se muestra una serie de aleaciones con su respectiva temperatura crítica (T_c) :

Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
												1.180					
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Gc	As	Se	Br	Kr
			0.39	5.38							0.875	1.091					
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
			0.546	9.20	0.92	7.77	0.51				0.56	3.4035	3.722				
Cs	Bg	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
		6.00		4.483	0.012	1.698	0.655	0.14			4.153	2.39	7.193				
Fr	Ra	Ac															
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			1.36	1.4	0.68												
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw	

TABLA I

TEMPERATURAS CRITICAS (EN GRADOS KELVIN) PARA ELEMENTOS PUROS

ALEACION	T _c (KELVIN).
V3Ga	15.0
V3Si	17.1
Nb3Sn	18.3
Nb3Al	18.8
Nb3Ga	20.3
Nb3Ge	23.3
Y1Ba2Cu3O7	98.0

TABLA II ALEACIONES Y TEMPERATURAS

Es importante hacer notar el enorme salto en el valor de la T_c cuando se utilizan aleaciones de tierras raras con cobre y oxígeno.

El segundo de los efectos que definen a un superconductor es de carácter magnético. Este efecto fué descubierto por Meissner y Ochsenfeld en 1933 y consiste en la aparición de un estado diamagnético perfecto por debajo de la T_c; dicho efecto se le conoce como " efecto Meissner " y aunque la secuencia experimental que llevó a su descubrimiento se analizará más adelante, cabe mencionar que la principal característica del nombrado efecto, es que el material en estado superconductor no permite flujo magnético en su interior independientemente de su historia térmica.

En resumen, las características macroscópicas más notables de los superconductores son las eléctricas y las magnéticas. Sin embargo, además de las dos evidencias experimentales mencionadas, existen otras que de alguna manera, describen las características importantes poseídas por los compuestos superconductores y estas son: la densidad de flujo magnético (B) y el campo magnético (H); las cuales se analizarán más adelante.

1.2 EL INICIO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

La historia de la superconductividad se remonta al siglo XIX, cuando en los físicos de ese entonces se despertó el interés por licuar todos los gases conocidos hasta ese momento. Esto era de suma importancia ya que la licuefacción de los gases permitiría estudiar los fenómenos que se presentan en los materiales a temperaturas muy bajas.

Así en 1845 Michael Faraday perfeccionó una técnica para licuar gases, sin embargo dicha técnica no resultó útil para la licuefacción de gases como: el helio (He), el hidrógeno (H), el oxígeno (O₂), el nitrógeno (N₂), el metano (CH₄), el monóxido de carbono (CO), y el óxido nítrico (NO); los cuales eran los únicos gases que faltaban por licuar.

Para 1877 Luis Caillet logró licuar el oxígeno (90.2K = -252.36C) y realizar descubrimientos que presentaron la posibilidad de licuar el aire y que fueron la base que posteriormente permitió el desarrollo de un método para licuar el helio.

En 1898 James Dewar de la Royal Institution de Londres pudo licuar el hidrógeno (20.8K = -252.36C), y diez años más tarde, en 1908 en la Universidad de Leyden-Holanda, fue Heike Kamerlingh Onnes quien obtuvo por primera vez en el mundo helio líquido, el cual tiene una temperatura de ebullición de 4.22K.

En aquella época, se sabía que los metales tienen una resistividad que disminuye de manera prácticamente lineal con la temperatura, hasta unos 20K aproximadamente; pero ¿qué ocurría con la resistividad a temperaturas más bajas?, Kamerlingh Onnes decidió entonces hacer el análisis y para ello eligió el mercurio ya que es un elemento que puede conseguirse con un alto grado de pureza y que, además, es conductor en estado metálico. De este modo, en 1911 enfriando el mercurio a muy baja temperatura, pudo observar un fenómeno nuevo y totalmente inesperado: a una temperatura de 4.2K, el mercurio pasaba bruscamente a un estado en el que de repente no ofrecía resistencia alguna al paso de la corriente. Esta transición se manifestaba por una caída muy brusca de la resistividad como se aprecia en la figura I.1.

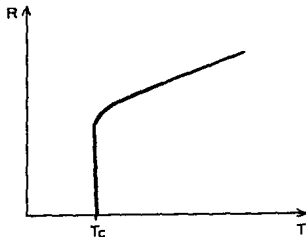


FIGURA I.1. REPRESENTACION GRAFICA DEL DESCUBRIMIENTO HECHO POR KAMERLINGH.

Kamerlingh Onnes había descubierto la superconductividad.

Así transcurrieron varios años hasta que en 1954 con el compuesto V_3Si se alcanzó una T_c de 17.1K, a lo cual siguió el descubrimiento del Nb_3Ge con una T_c de 23K. La elevación de las temperaturas críticas prosiguió aunque de manera muy lenta.

De esta forma Bednorz y Müller descubrieron en 1986 los primeros indicios de superconductividad a alta temperatura crítica en una nueva familia de compuestos: óxidos de cobre y bario que contenían lantano; los cuales han dado la pauta para ir logrando temperaturas cada vez más y más altas y con esto pensar en que el uso industrial de los superconductores va a ser una muy próxima realidad.

I.3 SUPERCONDUCTIVIDAD A ALTA TEMPERATURA

Los superconductores formados por óxidos metálicos no son tan recientes como podría pensarse. En 1967 ya se conocía el compuesto $SrTiO_3$ con una $T_c=0.7K$. Posteriormente se encontró el compuesto formado por $BaPbBiO_3$ en 1975 con una $T_c=13K$ y aún cuando esta temperatura era todavía muy baja, también era muy alentadora, ya que en ese entonces no se tenían noticias de temperaturas críticas que fueran más elevadas, ni siquiera cercanas a los 13K, por tal motivo se le considera a dicho compuesto el predecesor de los superconductores a alta temperatura.

Estudiando más detalladamente las propiedades de los óxidos superconductores, diversos grupos de investigadores de todo el mundo encontraron una característica común a todos aquellos compuestos estudiados y es que la concentración de sus electrones es un orden de magnitud menor que en los metales; esta característica encontrada les pareció muy interesante a todos los investigadores y coincidieron en que era pertinente utilizar compuestos óxidos para buscar la superconductividad a alta temperatura.

Así, en enero de 1986 en el laboratorio de investigaciones de IBM en Zurich, se tuvo el primer indicio tangible de la superconductividad a alta temperatura. Al enfriar una muestra de óxido de cobre, bario y lantano; Bednorz y Müller enfriaron una muestra de óxido de cobre, bario y lantano, y observaron que la resistencia eléctrica de dicha muestra comenzaba a disminuir rápidamente a una temperatura alrededor de 20K, después, cambiando la concentración de bario, observaron una T_c de 30K, de esta forma se iniciaba el ascenso de las temperaturas críticas.

En septiembre del mismo año Bednorz y Müller obtuvieron el segundo indicio formal de la existencia de la superconductividad a alta temperatura con el compuesto de óxido de cobre, bario y lantano; lo que ellos hicieron en su investigación, primeramente fué bajar la temperatura de la muestra del superconductor a una temperatura ligeramente menor a la T_c que ya conocían, enseguida le aplicaron un campo magnético a la muestra y observaron que al mismo tiempo que aplicaban el campo, la muestra levitaba y cuando dejaban de aplicarlo la muestra dejaba de levitar; esto ocurre precisamente porque la muestra impide ser penetrada por el campo magnético; dicho de otra manera, Bednorz y Müller observaron que su muestra no sólo presentaba $R=0$ sino también diamagnetismo perfecto.

En diciembre del mismo año, dos equipos de investigadores: 1) del profesor Tanaka en Tokio; y 2) un grupo de los laboratorios ATT Bell en Estados Unidos; sustituyendo el bario por estroncio consiguieron aumentar la temperatura crítica de transición alrededor de 40K. Por su parte C. W. Chu y sus colaboradores (de la Universidad de Houston) sometiendo a presión los compuestos de bario, llegaron a temperaturas del orden de los 50K. Este mismo equipo con la colaboración de M. K. Wu (de la Universidad de Alabama) descubrieron un nuevo compuesto de óxido de cobre, bario e itrio en lugar de lantano ($YBa_2Cu_3O_7$) en 1987; siendo a partir de entonces el más estudiado y por brevedad se le conoce como el compuesto 1:2:3 con itrio en razón de su estequiometría.

Para enero de 1988 Hiroshi Maeda del Instituto Nacional de Investigación en metales en Japón obtuvo una temperatura de 106K con un compuesto de óxido de cobre, calcio, estroncio y bismuto. Posteriormente, en marzo de 1988 se tuvo un gran descubrimiento, ese fué el compuesto $ThBaCaCuO$ obtenido por S. Parkin de IBM, con el que se logró una superconductividad a $T_c=125K$. Lamentablemente el talio es extremadamente venenoso y puede no resultar benéfico en aplicaciones prácticas. Lo más importante de todo esto es que puede marcar una pauta a seguir para encontrar un compuesto no tóxico con el cual se obtengan mayores temperaturas críticas.

En la tabla III se muestra a grandes rasgos el desarrollo de los cerámicos superconductores a altas T_c .

FECHA	COMPUESTO	Tc	INSTITUCION	INVESTIGADORES
Abril 1986	LaBaCuO	30K	IBM-Zurick	Alex Müller George Bednorz
Diciembre 1986	LaBaCuO	30K	Universidad de Tokio	Shoji Tanaka Koichi Kitazawa
	LaBaCuO bajo presión	40K	Universidad de Houston	Paul Chu y sus colaboradores
	LaSrCuO	36K	ATT Bell	Robert Cava
Enero 1987	LaBaCuO	70K	Academia China de Ciencias	Z. X. Zhao
Febrero 1987	YBaCuO	95K	Universidades de Houston y Alabama	Paul Chu Mau-Kuen Wu
Mayo 1987	YBaCuO Ic=10EX5 (A/cm2)	95K	IBM Yorktown	Praveen Chaudhari
Enero 1988	BiSrCaCuO supercond a 100K	85K	I. N. I. M. de Japon	Hiroshi Maeda
Febrero 1988	TlBaCaCuO	106K	U. de Arkansas	Allen Hermann
Marzo 1988	ThBaCaCuO	125K	IBM de Almaden	S. Parkin

TABLA III INVESTIGACIONES DE SUPERCONDUCCION A ALTA TEMPERATURA (Tc)

C A P I T U L O I I

CARACTERISTICAS DE UN SUPERCONDUCTOR

II.1 RESISTENCIA NULA

A principios de siglo se sabía que para que un material presentara una resistencia "nula", éste debía ser completamente puro, ya que de no ser así, las impurezas del material tenderían a estar dispersas y ocasionarían una cierta resistencia residual (R_0) que de ninguna manera permitirían llegar al material a una resistencia cero. El conocimiento teórico que tenían los científicos de ese entonces se aprecia gráficamente en la figura II.1.

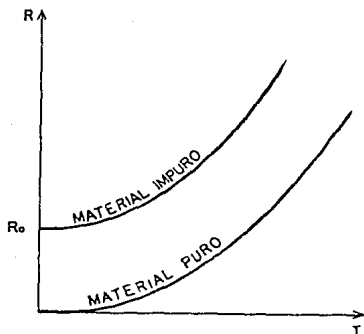


FIGURA II.1. CURVAS TEORICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES AL DISMINUIR LA TEMPERATURA.

Pero la práctica demostró que cuando un metal es enfriado, su resistencia eléctrica decrece por el camino usual hasta que repentinamente, a una temperatura cercana al cero absoluto se pierde toda la resistencia eléctrica, o sea, tiene resistencia nula (ver figura II.2).

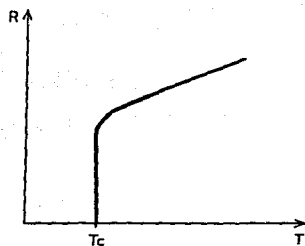


FIGURA II.2. CURVA EXPERIMENTAL QUE MUESTRA LA AUSENCIA TOTAL DE RESISTENCIA A UNA CIERTA TEMPERATURA T_c .

En este aspecto, la diferencia principal que existe entre un material puro y uno impuro, es su transición al estado de la superconductividad, ya que un metal puro muestra una transición muy aguda mientras que un material impuro utiliza una región bastante amplia para su transformación (ver figura II.3).

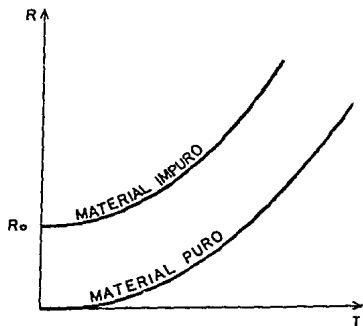


FIGURA II.3. TRANSICION A LA SUPERCONDUCTIVIDAD EN EL ESTAÑO.

Para fines prácticos, esto no es significativo ya que los dos materiales como lo muestra la gráfica de la figura II.3, llegan a resistencia cero a la misma temperatura crítica de transición; y la superconductividad se presenta por debajo de dicha temperatura.

II.2 LA TEORIA BCS

Aunque hace más de setenta años se descubrió la superconductividad, apenas en 1957 se presentó la teoría microscópica que explica el mecanismo que provoca la ausencia total de resistencia eléctrica en los materiales superconductores; esta teoría fué la aportación que hicieron a la ciencia: John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer, de ahí que se le conozca como la teoría BCS de la superconductividad y por la cual los investigadores mencionados se hicieron acreedores al Premio Nobel de Física de 1957.

En un conductor ordinario, la corriente eléctrica la llevan electrones "individuales", es decir, que cada uno de ellos sigue su propia trayectoria, así, cada electrón sufre un gran número de colisiones debido tanto a las impurezas que contenga el material como a la estructura de la red que lo constituya, de tal forma que dichas colisiones ocasionan una pérdida de energía, la cual se refleja como una resistencia eléctrica al paso de la corriente.

La teoría BCS se basa en el papel que juegan los modos normales de vibración de la red (fonones) como mediadores en la interacción de los electrones al bajar la temperatura. Una forma de representar el movimiento de los electrones es justamente como trayectorias que estos siguen a través de la red, de modo tal que se puede decir que la dispersión de los electrones es un cambio continuo y variado de su trayectoria. Así, en 1950 Frohlich demostró que la interacción electrón-fonón es capaz de acoplar a un par de electrones como si estos tuvieran una interacción atractiva entre sí. El proceso de interacción electrón-fonón es visto como un proceso de colisión en donde se conservan la energía y el momento. Esto es, si un electrón colisiona y emite un fonón se tiene entonces:

$$p_1 = p_1' + q \text{ -----ec. A}$$

en donde, p_1 es el momento del electrón antes de la dispersión, p_1' es el momento del electrón después de la dispersión y q es el momento del fonón; simultáneamente a la emisión del fonón, otro electrón de momento p_2 absorbe la vibración, de tal modo que:

$$p_2 + q = p_2' \text{ -----ec. B}$$

como el fonón emitido por el primer electrón es absorbido por el segundo electrón, entonces las ecuaciones A y B se restan, haciendo esto entonces se tiene:

$$\begin{array}{r}
 p_1 = p_1' + q \\
 - \\
 p_2' = p_2 + q \\
 \hline
 p_1 - p_2' = p_1' + q - p_2 - q
 \end{array}$$

por lo tanto se tiene: $p_1 + p_2 = p_1' + p_2'$ -----ec. C

La ecuación C muestra que el momento se conserva entre el estado inicial y el estado final. Esto ocurre con todos los electrones del material, formándose entonces una gran cantidad de pares de electrones conocidos como "pares de Cooper", los cuales por encontrarse en el mismo estado cuántico ocasionan que la corriente eléctrica tenga lugar mediante un movimiento de conjunto de los electrones emparejados, de tal forma que no hay colisiones, no hay disipación de energía y por lo tanto no hay presencia de resistencia eléctrica.

Es necesario aclarar, que el comportamiento colectivo y coherente es lo que hace posible que los pares no sean dispersados por las imperfecciones de la red. Esto es, si todos los pares están condensados a la misma energía, entonces la única forma para que el sistema cambie (dispersión a colisión), es que todos los pares cambien su estado cuántico simultáneamente y esta posibilidad es despreciable ya que los pares de Cooper se forman precisamente en el mismo estado cuántico.

Una de las predicciones más importantes de la teoría es referida a la mínima energía necesaria para romper un par; esta energía depende fuertemente de la temperatura la cual tendría que ser muy elevada para poder romper un par, así la energía y la temperatura crítica están relacionadas de la siguiente manera:

$$E_g = 3.52 K T_c \text{-----ec. 1}$$

donde:

K = constante de Boltzman = 1.38×10^{-23} (J/K)
 Tc = temperatura crítica de transición (K)

Esta predicción teórica ha sido comprobada experimentalmente y los resultados han demostrado que es excelente para la mayoría de los superconductores. La teoría BCS representa así un magnífico modelo microscópico mediante el cual se pueden interpretar muchos de los fenómenos involucrados en la superconductividad.

II.3 DIAMAGNETISMO PERFECTO

El segundo de los efectos que caracterizan a un superconductor es de carácter magnético y para explicar dicho efecto es necesario recurrir al descubrimiento que hicieron en 1933 W. Meissner y R. Oschenfeld, ellos encontraron experimentalmente que un superconductor se comporta de tal forma que nunca permite que exista un campo de inducción magnética en su interior, el campo magnético en el interior de un superconductor no sólo está congelado, sino que vale cero; en otras palabras, el efecto Meissner-Oschenfeld consiste en la aparición de un estado diamagnético perfecto por debajo de la T_c .

De lo antes mencionado se puede deducir que el estado de magnetización del material que pasa por la transición superconductor no depende de la secuencia que se haya seguido al aplicarle el campo magnético. Y precisamente esto es lo que marca la diferencia principal que existe entre un conductor perfecto y un superconductor.

CONDUCTOR PERFECTO Presenta:

- 1) Resistencia eléctrica igual a cero.

SUPERCONDUCTOR Presenta:

- 1) Resistencia eléctrica igual a cero.
- 2) Efecto Meissner-Oschenfeld.

Para comprender más ampliamente esta diferencia, a continuación se presenta la secuencia experimental que llevó al descubrimiento del efecto antes mencionado.

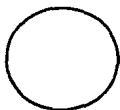
CONSIDERANDO AL CONDUCTOR PERFECTO

Secuencia I del experimento realizado por Meissner y Oschenfeld.

a) En ausencia de campo magnético externo se toma la muestra a una temperatura T mayor que la temperatura crítica T_c , al estado de resistencia cero del conductor.

$$\vec{B} = 0$$

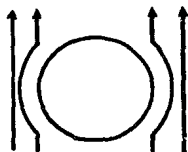
$$T > T_c$$



b) Se enfría la muestra a una temperatura inferior a la temperatura crítica y se introduce un campo magnético.

$$\vec{B} \neq 0$$

$$T < T_c$$

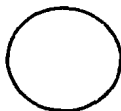


Como el instante en que ocurrió la transición al estado de conductor perfecto el campo magnético en el interior de la muestra era cero, permanecerá con ese valor y por lo tanto, el campo magnético será excluido del interior de la muestra.

c) Finalmente se suprime el campo magnético aplicado, manteniendo la temperatura por debajo de T_c . Se obtiene que el campo magnético en el interior de la muestra sigue siendo cero.

$$\vec{B} = 0$$

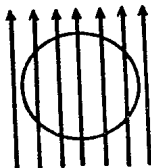
$$T < T_c$$



Secuencia II del experimento realizado por Meissner y Oschenfeld.

a) Se toma la muestra nuevamente a una temperatura mayor a T_c pero con un campo magnético externo aplicado distinto de cero.

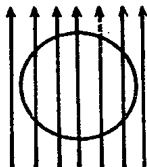
$$T > T_c$$



b) La muestra se enfría a una temperatura inferior a la temperatura crítica. El campo magnético en el interior de la muestra sigue siendo el mismo que había antes de enfriarla.

$$\vec{B} \neq 0$$

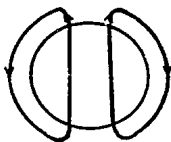
$$T < T_c$$



c) Finalmente se suprime el campo magnético aplicado y lo que ocurre es que se generan corrientes superficiales en la muestra de tal modo que el campo en el interior de ella tenga el mismo valor que tenía antes de bajar la temperatura (a T menor que T_c).

$$\vec{B} = 0$$

$$T < T_c$$



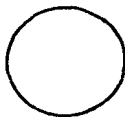
CONSIDERANDO A UN SUPERCONDUCTOR

Secuencia III del experimento realizado por Meissner- Oschenfeld.

a) Se toma la muestra a una temperatura mayor a la temperatura crítica de transición y sin la presencia de un campo magnético aplicado.

$$\vec{B} = 0$$

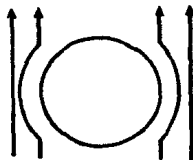
$$T > T_c$$



b) Posteriormente se enfría la muestra por debajo de la T_c y se introduce un campo magnético diferente de cero.

$$\vec{B} \neq 0$$

$$T < T_c$$

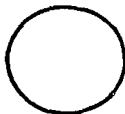


Por el efecto Meissner-Oschenfeld se inducirán corrientes superficiales en la muestra de tal forma que el campo en su interior sea cero.

c) A continuación el campo magnético aplicado se suprime. Las corrientes superficiales desaparecen y el campo magnético en el interior de la muestra es cero.

$$\vec{B} = 0$$

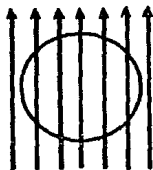
$$T < T_c$$



Secuencia IV del experimento realizado por Meissner y Oschenfeld.

a) Considerando ahora el otro camino, se toma nuevamente la muestra superconductora a una temperatura mayor a la temperatura crítica de transición y ahora en presencia de un campo magnético aplicado distinto de cero.

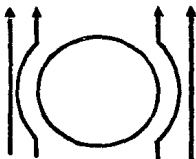
$$T > T_c$$



b) Después se enfría la muestra hasta una temperatura inferior a la temperatura crítica. Se tiene que por el efecto Meissner-Oschenfeld se inducirán corrientes superficiales en la muestra, de tal forma que el campo magnético en el interior de ella es cero.

$$\vec{B} \neq 0$$

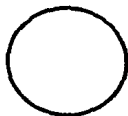
$$T < T_c$$



c) Para concluir con el experimento se suprime el campo externo y se tiene que las corrientes superficiales desaparecen y que el campo magnético en el interior de la muestra vale cero.

$$\vec{B} = 0$$

$$T < T_c$$



Como se acaba de ver, debido al efecto Meissner-Oschenfeld el estado de magnetización de la muestra no depende de la secuencia que se utilice para llegar al estado final.

Es claro que un superconductor además de ser un conductor perfecto es también un material con diamagnetismo perfecto.

II.3.1 PROFUNDIDAD DE PENETRACION

Como ya se ha mencionado, el diamagnetismo perfecto de un superconductor impide que fluya corriente eléctrica através del material, únicamente fluyen en la capa de la superficie, cuyo espesor es del orden de 1×10^{-5} (cm), y a dicha profundidad en la que la corriente fluye se le llama "profundidad de penetración". Lo anterior se muestra gráficamente en la figura II.4.

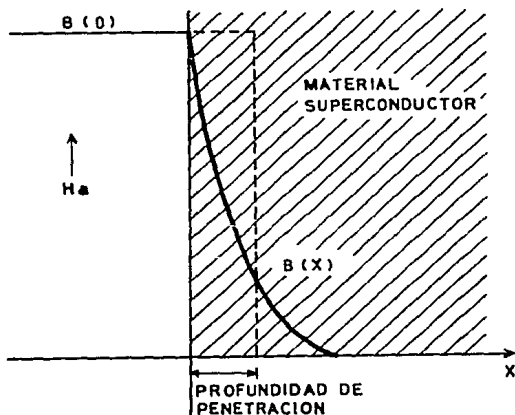


FIGURA II.4. PROFUNDIDAD DE PENETRACION EN UN MATERIAL SUPERCONDUCTOR.

La profundidad de penetración dada, no tiene un valor fijo sino que varía con la temperatura; a bajas temperaturas la profundidad de penetración es prácticamente independiente de la temperatura y presenta un valor λ_0 característico para un material en particular, esto se aprecia mejor en la tabla IV.

METAL	In	Al	Pb
λ_0 (cm)	6.4X10EX-6	5X10EX-6	3.9X10EX-6

TABLA IV PROFUNDIDADES DE PENETRACION CARACTERISTICAS DE TRES MATERIALES A TEMPERATURA DE 0K.

Así, cuando la temperatura es mayor, la profundidad de penetración se puede obtener a través de la siguiente relación:

$$\lambda = \lambda_0 / (1 - t^4) \text{-----ec.2}$$

donde t es la temperatura relativa de transición, $t = T/T_c$.

C A P I T U L O I I I

VARIABLES CRITICAS

III.1 CAMPO MAGNETICO CRITICO (Hc)

En un superconductor la corriente fluye en el material a través de una pequeña profundidad de penetración, la corriente que circula en el superconductor genera un campo magnético alrededor del material, de tal forma que cuando se le aplica un campo magnético externo, entonces el campo magnético generado repele al campo magnético aplicado cancelándolo y evitando que penetre al material (efecto Meissner-Oschenfeld). Si la intensidad del campo magnético aplicado se incrementa, entonces la corriente que está fluyendo en el superconductor también se incrementa y por consiguiente aumenta el campo magnético que se genera alrededor del material, de tal forma que se logra seguir manteniendo el diamagnetismo perfecto. Si el campo magnético aplicado se incrementa más aún, entonces la corriente aumenta nuevamente generando así un campo magnético más grande, hasta un punto en el que la corriente rebasa la profundidad de penetración máxima que permite el material utilizado para trabajar como superconductor, en ese momento el campo magnético generado también llega a su valor máximo y cuando este campo generado es menor que el campo magnético aplicado, éste no alcanza a ser excluido del interior del material, marcando así una transición del estado superconductor al estado conductor.

Esta destrucción de la superconductividad por un campo magnético lo suficientemente fuerte, es una de las propiedades más importantes de un superconductor.

Todo esto quiere decir que a cualquier temperatura T menor que Tc, el estado superconductor puede ser destruido por la aplicación de un campo magnético con intensidad mayor que un cierto campo magnético crítico Hc.

Experimentalmente se encontró que el campo magnético crítico Hc depende directamente de la temperatura a la cual se encuentre el material, en dicha investigación se tomaron una serie de mediciones de temperatura y campo magnético, las cuales al plasmarse punto a punto en un par de ejes coordenados dieron como resultado un diagrama llamado diagrama de fase (figura III.1).

De esta forma, los datos experimentales revelaron que la variación de Hc con respecto a la temperatura queda descrita por una parábola definida en la siguiente ecuación:

$$H_c = H_0(1 - (T/T_c)^2) \text{ ----- ec. 3}$$

donde: Hc campo magnético crítico
Ho campo magnético crítico a T=0 absoluto
T temperatura del material T menor que Tc
Tc temperatura crítica de transición

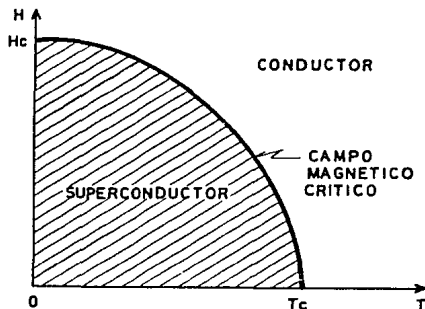


FIGURA III.1. DIAGRAMA DE FASE PARA UN MATERIAL SUPERCONDUCTOR

Lo anterior muestra claramente que H_c es diferente para cada material superconductor y a la vez, cada material superconductor puede ser caracterizado por sus valores de T_c y H_0 , así, conociendo éstos y la ecuación mostrada es posible realizar el diagrama de fase del material superconductor que se desee analizar, por ejemplo: en la figura III.2 se muestran los diagramas de fase para tres materiales diferentes.

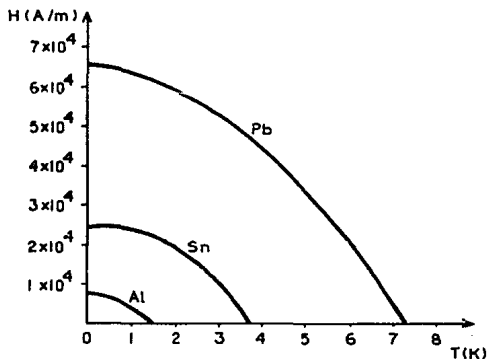


FIGURA III.2. DIAGRAMAS DE FASE PARA TRES DISTINTOS MATERIALES (ALUMINIO, ESTRONCIO Y PLOMO)

De igual forma se pueden elaborar los diagramas de fase de las sustancias que se presentan en la tabla V.

SUSTANCIA	Ho(Gauss)
Ir	20
Cd	30
Ga	51
Zn	53
Os	65
Ru	66
Al	99
Th	168
Tl	171
Re	199
In	293
Sn	309
Hg (dependiendo de la fase)	máximo 411
Pb	803
Ta	830
W	1070
V	1370
Te	1410
La	1600
Nb	1944
V3Ga	20.80X10EX4
V3Si	17.10X10EX4
Nb3Sn	18.30X10EX4
Nb3Al	18.80X10EX4
Nb3Ge	36.00X10EX4
Nb3AlGe	41.00X10EX4
Y1Ba2Cu3O7	mayor de 1.00X10EX6

TABLA V VALORES DE CAMPO MAGNETICO CRITICO PARA CADA SUSTANCIA A UNA TEMPERATURA DE CERO KELVIN.

III.2 CORRIENTE CRITICA (Ic)

Los trabajos de investigación que siguieron al descubrimiento de la superconductividad y que también fueron realizados por H. Kamerlingh Onnes, revelaron que a cualquier temperatura T menor a Tc el estado superconductor de un material puede desaparecer si la corriente que se esté aplicando excede de un cierto valor; a dicha cantidad de corriente se le llama "corriente critica" (Ic); además se sabe que la corriente critica está relacionada con la fuerza del campo magnético crítico Hc.

Analizando esto, es necesario recordar que la corriente I en un superconductor fluye en la superficie del mismo con una cierta profundidad de penetración debido al flujo magnético B al que ha sido expuesto el superconductor y al que le corresponde un campo magnético aplicado H_a .

$$H_a = B / \mu_0 \text{-----ec. 4}$$

donde: μ_0 es la permeabilidad magnética del material.

Asimismo se sabe que el campo magnético depende de la temperatura a la que esté expuesto el material hasta obtener un campo magnético crítico; lo cual deja ver que la corriente crítica es aquella en la que se presenta la transición del estado de superconductividad al estado de conductividad normal, así es que existe un valor máximo de corriente que un superconductor puede llevar y que ésta depende del campo aplicado a la muestra; pero asimismo I_c dependerá de la forma en que se aplique el campo externo H_a . De esta forma se pueden tener dos casos, uno que es cuando se aplica el campo magnético externo a lo largo del cable superconductor y otro caso es cuando el campo magnético externo es aplicado en forma perpendicular al alambre superconductor:

CASO I

Si el campo magnético externo (H_a) se aplica a lo largo del cable superconductor como lo muestra la figura III.3 donde está fluyendo una corriente i , y ésta genera un campo magnético H_i alrededor del cable superconductor, entonces los vectores H_a y H_i forman un ángulo de 90 grados como se aprecia en la misma figura.

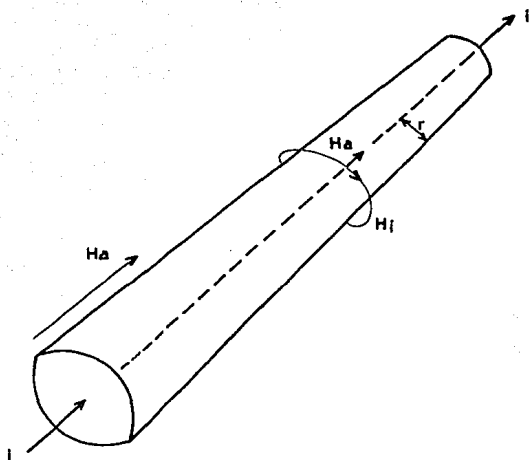


FIGURA III.3. CAMPO MAGNETICO APLICADO (H_a) PARALELAMENTE AL SUPERCONDUCTOR.

- H_a campo magnético aplicado
- H_i campo magnético debido a I que puede llegar a ser H_c
- i flujo de corriente eléctrica que puede llegar a ser I_c
- r radio del alambre

El campo magnético aplicado está en dirección paralela al eje del cilindro superconductor, de manera que el comportamiento de la corriente (i) con respecto del campo aplicado (H_a) es como el que se muestra en la figura III.4, donde la máxima corriente (I_c) que puede circular en el material para trabajar en el estado superconductor está dada por:

$$I_c = \sqrt{(H_c^2 - H_a^2) 4\pi r^2} \text{ -----ec. 5}$$

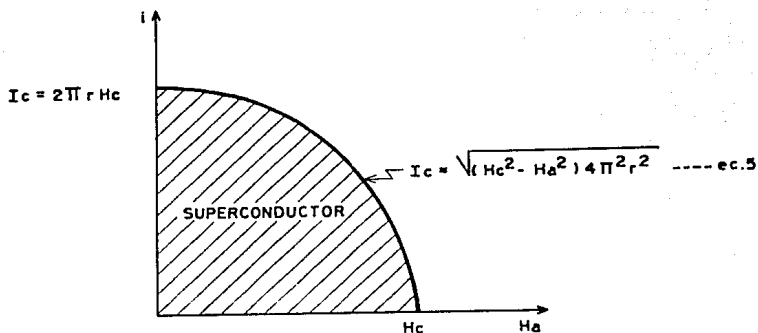


FIGURA III.4. COMPORTAMIENTO DE I_c CUANDO EL CAMPO H_a SE APLICA A LO LARGO DEL CABLE SUPERCONDUCTOR.

Retomando la ec. 5, se tiene que, si no hay campo magnético aplicado, entonces la corriente I_c depende directamente de las dimensiones del cable superconductor y del campo magnético que genere dicha corriente, teniendo:

$$I_c = 2\pi r H_c \text{ ----- ec. 6}$$

Si no hay flujo de corriente eléctrica, entonces se tiene que el campo magnético crítico depende del campo magnético aplicado al superconductor:

$$H_a = H_c \text{ ----- ec. 6'}$$

Esto delimita los puntos críticos de transición de la superconductividad a la conductividad, aun cuando se tenga a la muestra en una temperatura inferior a la temperatura crítica y además muestra que en ausencia de campo magnético aplicado, las corrientes críticas de los superconductores pueden ser muy altas. Por ejemplo, para el caso del plomo, si se tiene un alambre de 1 mm de diámetro, enfriado en helio líquido a su temperatura de ebullición (4.2K), el alambre es capaz de llevar hasta 140 Amperes de corriente superconductor (con resistencia nula).

CASO II

En este segundo caso el campo magnético H_a se aplica en forma perpendicular al alambre superconductor como se muestra en la figura III.5.

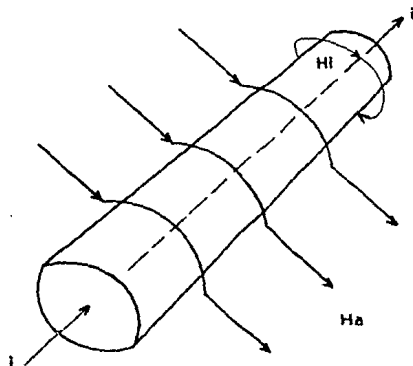


FIGURA III.5. CAMPO MAGNETICO H_a APLICADO PERPENDICULARMENTE AL SUPERCONDUCTOR.

Viendo al conductor y al campo aplicado desde otro ángulo, se puede apreciar al alambre superconductor en el seno de un campo magnético perpendicular al eje del alambre como se puede observar en la figura III.6.

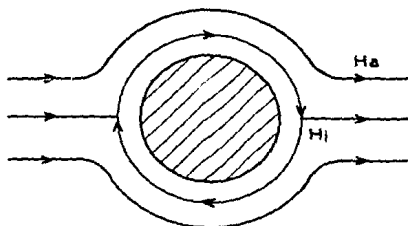


FIGURA III.6. ALAMBRE SUPERCONDUCTOR EN EL SENO DE UN CAMPO MAGNETICO APLICADO.

La corriente fluye en una dirección perpendicular al plano de la página como si estuviese entrando hacia ella; de este modo, el campo aplicado H_a y el campo H_i generado por la corriente y que circula por el alambre, se suman en la parte superior de la sección transversal del alambre y se restan en la parte inferior. Así es que el campo generado por la corriente tiene que cancelar tanto al campo H_a que llega por la parte superior, como al campo H_a que llega por la parte inferior del superconductor, de tal forma que dicho comportamiento se puede expresar algebraicamente como se hace en la siguiente ecuación:

$$H_c = 2H_a + I_c/2\pi r \text{ -----ec. 7}$$

Despejando de la ecuación 7 se obtiene la ecuación que define el comportamiento de la corriente I_c la cual depende del campo aplicado (H_a) y del máximo campo magnético (H_c) que pueda generar la corriente antes de que el material deje el estado superconductor.

$$I_c = 2\pi r(H_c - 2H_a) \text{ -----ec. 8}$$

Si no hay campo magnético aplicado la ec.8 queda: $I_c = 2\pi r H_c$

Si no hay flujo de corriente eléctrica entonces: $H_a = (1/2)H_c$

Así, el comportamiento de la corriente y de los campos magnéticos para este segundo caso se puede apreciar gráficamente en la figura III.7.

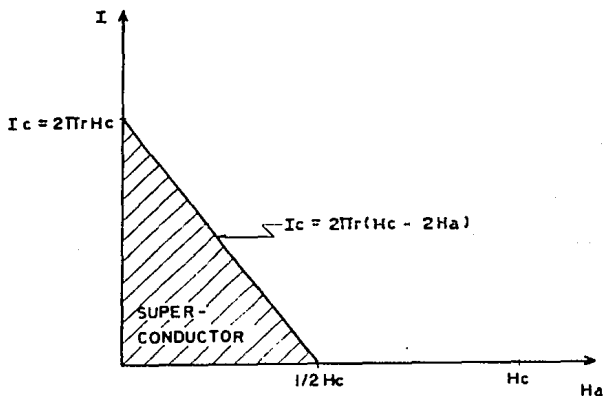


FIGURA III.7. COMPORTAMIENTO DE I_c CUANDO EL CAMPO H_a SE APLICA EN FORMA PERPENDICULAR AL CABLE SUPERCONDUCTOR.

Observando las gráficas de las figuras III.4 y III.7 que corresponden a los casos I y II respectivamente, se puede notar que las áreas correspondientes al estado superconductor son distintas la una de la otra y que si se pretende utilizar al máximo el estado de superconductividad del material, entonces es preferible aplicar el campo magnético a lo largo del alambre superconductor, ya que de esta forma el material pasará al estado de conductividad normal hasta haberse generado un campo magnético H_c , mientras que en el otro caso esto sucederá cuando apenas se tenga la mitad de dicho campo.

III.3 TRIUNVIRATO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Como se ha visto hasta ahora, el flujo de corriente, la temperatura y el campo magnético se encuentran asociados entre sí y pueden variar hasta llegar a valores críticos antes de dejar el estado superconductor, de tal forma que los límites se encuentran en T_c (temperatura crítica), I_c (corriente crítica) y H_c (campo magnético crítico), de tal forma que las tres conforman el triunvirato de la superconductividad.

Además los tres valores críticos a los cuales ocurre la transición de conductividad a superconductividad, toma lugar en un punto fijo variando alguna de las características que intervienen en dicho triunvirato y que depende de las condiciones en que se encuentre expuesto el material (temperatura, campo magnético y flujo de corriente).

Esto ocurre de igual forma ya sea que el campo magnético se aplique externamente o que éste sea generado por la corriente que fluye a través del material superconductor.

Por ejemplo: conforme la temperatura se va incrementando y ésta es mayor que la temperatura a la cual se había enfriado el material, el volumen del flujo de corriente y el campo magnético se sostienen hasta que el superconductor deje de serlo y regrese a su resistividad normal.

De igual forma ocurre con el flujo de corriente en el material, sosteniendo la temperatura crítica y el campo magnético crítico antes de retornar a ser conductor.

Para poder comprender mejor aun como están relacionadas entre si las tres variables antes mencionadas, a continuación se presenta una gráfica donde, de hecho, es una superficie crítica en tres dimensiones, representando en el eje X, el campo magnético en Teslas; en el eje Y, la temperatura en grados Kelvin; y en el eje Z, la densidad del flujo de corriente en Amperes por centimetro cuadrado.

Los valores criticos de cada una de las tres variables marcan el límite entre la conductividad y la superconductividad, entonces la superconducción existe en el interior del volumen y desaparece hacia el exterior.

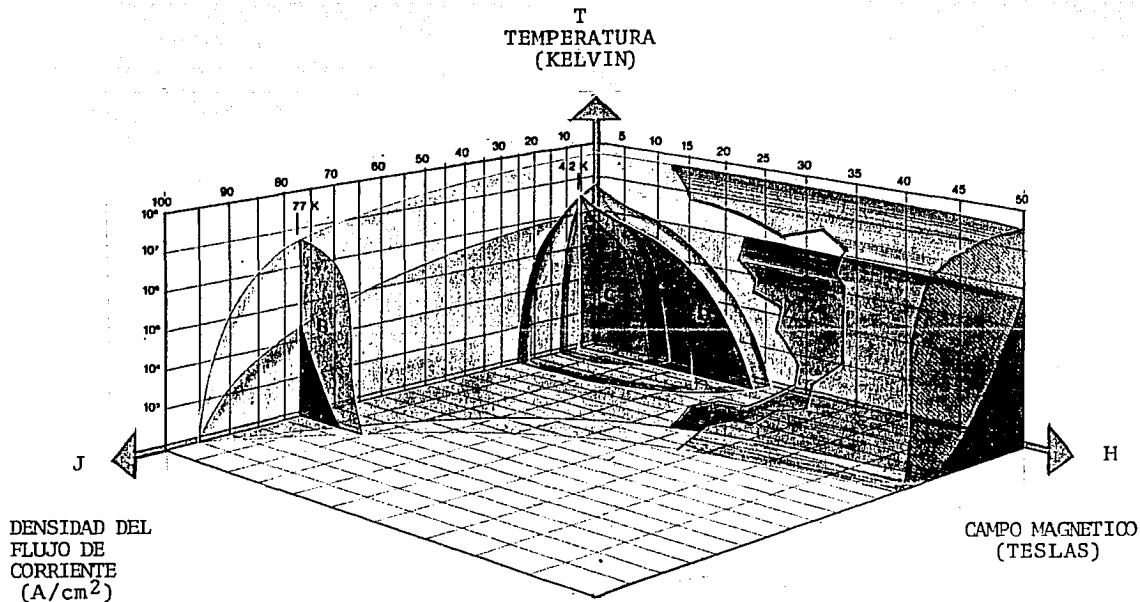


FIGURA III.8. REPRESENTACION GRAFICA DEL TRIUNVIRATO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD.

Como cada material o compuesto tiene sus propias y muy particulares: Tc, Ic y Hc, es lógico pensar que cada material tiene una curva única en un espacio en tres dimensiones.

El volumen encerrado bajo la capa de color lila corresponde al comportamiento del YBaCuO (compuesto cerámico), mientras que el espacio contenido bajo la capa de color café corresponde a materiales también cerámicos desarrollados por los laboratorios ATT Bell, estos materiales fueron para su estudio antes derretidos y texturizados mediante un proceso de crecimiento; estos dos compuestos fueron llevados hasta los 77K que es la temperatura de licuefacción del nitrógeno, y por encima de este valor se observó que para ambos materiales su Tc se encuentra alrededor de los 100K.

Además se hicieron los mismos estudios con superconductores tradicionales como lo son: un compuesto de titanio y niobio cuyos resultados están representados por el volumen de color verde; el otro material analizado fue el niobio cuyo volumen es el que se encuentra de color azul; como puede observarse ambos superconductores lo son a temperaturas sumamente bajas y con muy pequeños valores críticos tanto de corriente como de campo magnético, es más, podría decirse que no tienen futuro alguno después de haber visto volúmenes de superconductividad mucho mayores que estos.

Es importante hacer notar que precisamente los espacios en verde y azul corresponden a metales mientras que los de color lila y café son comportamientos de cerámicos; por lo tanto esta gráfica tridimensional es una de las pruebas macroscópicas más claras del porqué el futuro de los superconductores está en las cerámicas y no en los metales; y es entendible que las investigaciones que se realizan en todo el mundo están avocadas a estudios con compuestos cerámicos.

C A P I T U L O I V

ESTRUCTURA INTERNA DE LOS SUPERCONDUCTORES

IV.1 PEROVSKITAS

Los nuevos materiales superconductores a alta temperatura pertenecen a la familia de las cerámicas llamadas perovskitas; esto fué lo que encontró un grupo bastante serio de investigadores del Laboratorio de Geofísica del Instituto Carnegie de Washington; dicho equipo descubrió que los superconductores estructuralmente hablando son defectuosos y forman parte de la familia cristalográfica de las perovskitas.

Las perovskitas, reciben su nombre de un mineral específico conocido como perovskita, son cerámicas, materiales sólidos que están compuestos por elementos metálicos y no metálicos (usualmente oxígeno) y que además tienen un arreglo atómico muy particular. Estos son los minerales más abundantes de la tierra y siempre han estado en el interés de los geólogos ya que su análisis permite conocer la evolución histórica que ha sufrido el planeta desde su formación.

Esto es muy interesante desde el punto de vista tecnológico ya que las perovskitas son minerales naturales y que además presentan una gran variedad de propiedades eléctricas debido a que van desde aislantes hasta semiconductores, conductores superiónicos (donde los iones se comportan como si fuesen electrones, creando un flujo através del cristal) comportándose como metales conductores y ahora superconductores a alta temperatura.

Respecto a este interesante conjunto de propiedades, se encontró que la estructura ideal de algunas perovskitas presenta ligeras modificaciones en su red cristalina y precisamente son las perovskitas que presentan modificaciones las que forman el conjunto de las perovskitas superconductoras. Para comprender mejor la estructura interna de una cerámica superconductora, primero se analizará la estructura ideal de las perovskitas y en el siguiente subtema se verá en qué estriba la diferencia entre una perovskita normal y una perovskita superconductora.

La estructura básica de una perovskita es un cubo, como el que se muestra en la figura IV.1.

Un átomo metálico de gran tamaño ocupa la posición "A" que es en el centro del cubo, ocho átomos también metálicos; pero de menor tamaño se encuentran en las ocho esquinas de que consta el cubo, o sea en la posición "B"; y por último doce átomos no metálicos y más pequeños que los anteriores se localizan en la parte media de las aristas del cubo en cuestión, o sea, están situados en la posición "X".

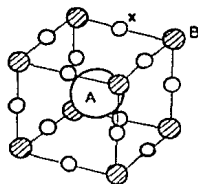


FIGURA IV.1. ESTRUCTURA BASICA DE UNA PEROVSKITA.

Los átomos "A" y "B" son cationes (iones con carga positiva), mientras que los átomos "X" son aniones (iones con carga negativa).

La fórmula que define a este cubo es $A_1B_8X_{12}$; pero una cerámica de la familia de las perovskitas está formada por muchos cubos iguales a éste, entonces cada catión "B" es parte de ocho cubos vecinos y cada anión "X" pertenece a cuatro cubos colindantes, de esta forma: A queda como A porque únicamente pertenece al cubo de estudio; B entre ocho queda B solamente y X_{12} entre cuatro da como resultado X_3 ; por lo tanto la fórmula de una perovskita es ABX_3 .

Si se pusieran más cubos iguales al de la figura IV.1, todos unidos por sus lados, se notaría claramente que cada catión "B" tiene como vecinos directos sobre las aristas a seis aniones "X" como se aprecia en la figura IV.2.

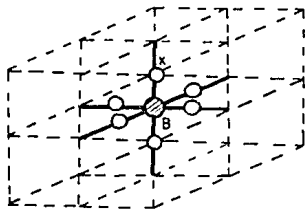


FIGURA IV.2. UN CATION "B" TIENE COMO VECINOS A SEIS ANIONES "X".

Colocando un octaedro en el vértice en cuestión, queda contenido en el centro del mismo el catión "B" y en cada esquina un anión "X" (figura IV.3).

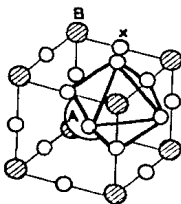


FIGURA IV.3. UN OCTAEDRO EN EL VERTICE DEL CUBO CONTIENE EN SU INTERIOR UN CATION.

Haciendo lo mismo en cada vértice del cubo se obtiene la estructura básica de una perovskita, y es precisamente como la que aparece en la figura IV.4.

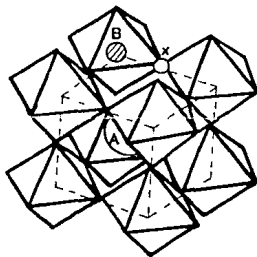


FIGURA IV.4. ESTRUCTURA BASICA DE UNA PEROVSKITA REPRESENTADA POR UN OCTAEDRO EN CADA VERTICE DEL CUBO.

Una vista general de un conjunto de perovskitas con los cationes "A" y "B" y los aniones "X" se vería como lo muestra la figura IV.5.

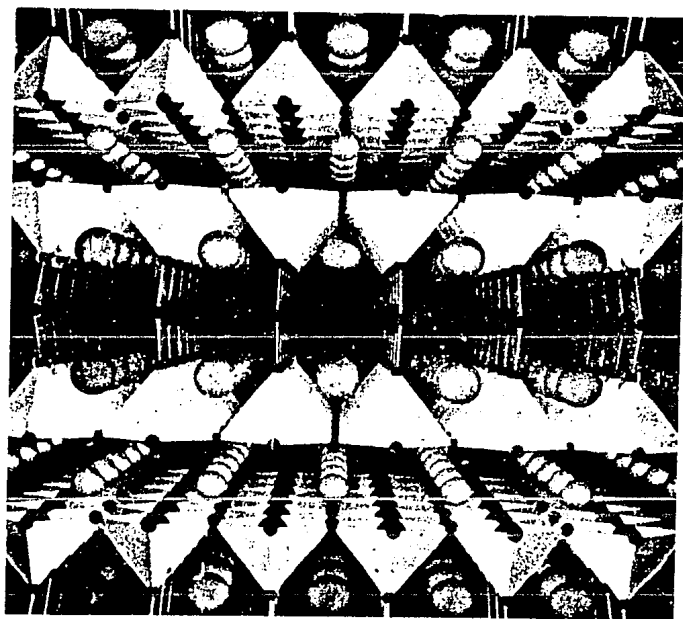


FIGURA IV.5. VISTA GENERAL DE UN CONJUNTO DE PEROVSKITAS.

IV.2 PEROVSKITAS DEFECTUOSAS

Aún cuando existen diversos superconductores con composiciones químicas distintas tales como: LaSrCuO , YBaCuO , BiSrCaCuO , TlBaCaCuO y otros mas, uno de los compuestos con los que se han obtenido muy buenos resultados, que se continúa estudiando en muchos laboratorios y del cual se espera por los investigadores obtener temperaturas más elevadas haciendole tal vez ligeras modificaciones, es el compuesto YBaCuO y por lo tanto es el que se utilizará para explicar a continuación porque es que los superconductores son considerados estructuralmente perovskitas defectuosas.

Recurriendo a la fórmula de una perovskita ABX_3 el compuesto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ consta de un átomo de Ytrio, dos átomos de Bario, tres átomos de Cobre y un máximo de siete átomos de oxígeno. Si los átomos de Ytrio y Bario suman tres y estos en una perovskita ocupan la posición A, entonces se tiene A_3 ; si los átomos de Cobre que son tres ocupan la posición B entonces se tiene B_3 ; por lo tanto se esperaría que si la perovskita (ABX_3) es afectada por un factor de 3 el superconductor debería cumplir $\text{A}_3\text{B}_3\text{X}_9$ donde X, como ya se mencionó anteriormente representa a los átomos de oxígeno, deberían tenerse nueve átomos de oxígeno y no siete como ocurre en realidad, esto revela la ausencia de dos oxígenos en la estructura básica del superconductor que está formada por tres perovskitas acomodadas en forma vertical, una encima de otra, quedando en la perovskita de enmedio el átomo de Ytrio en el centro del cubo y los dos átomos de Bario se encuentran cada uno en el centro de los cubos extremos, tal y como lo muestra la figura IV.6.

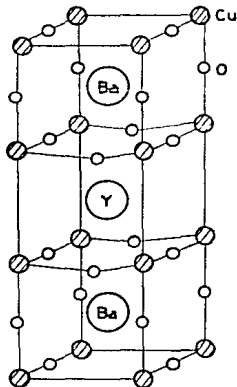


FIGURA IV.6. CELDA SUPERCONDUCTORA FORMADA POR DOS PEROVSKITAS DE BARIO Y UNA DE YTRIO.

La ausencia de oxigenos es a lo que se le considera el defecto o falla, y es precisamente este desperfecto el que hace posible la superconducción, ya que si no se presentara se trataría solamente de una cerámica mas.

Ahora bien, los estudios que permitieron determinar que los superconductores pertenecen a la familia de las perovskitas y que sufren de una carencia de oxigenos, fueron realizados por Ching-Wu Chu de la Universidad de Houston y sus colaboradores de la misma Universidad así como de la Universidad de Alabama. Para esto les fué de gran ayuda la utilización del difractómetro de cuatro círculos que puede proporcionar información acerca de la estructura microscópica de los cristales. (figura IV.7).

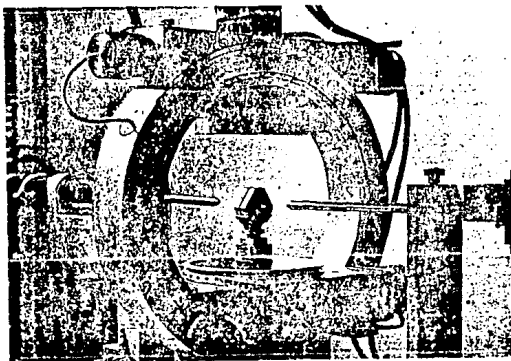


FIGURA IV.7. FOTOGRAFIA DE UN DIFRACTOMETRO DE CUATRO CIRCULOS.

IV.3 PLANOS Y CADENAS

Hasta mediados de 1988 la pregunta "del siglo" que se hacían los investigadores acerca de la alta temperatura en los superconductores era: ¿La causa de la superconductividad a alta temperatura se debe a los planos o a las cadenas?.

En el compuesto superconductor YBaCuO los átomos de cobre y oxígeno forman líneas en planos y cadenas y los investigadores consideran la posibilidad de que alguna de estas geometrías sea la que ayude a los electrones a asociarse entre sí para formar los pares de Cooper.

Tomando como base la teoría BCS, distintos grupos de investigadores en todo el mundo han coincidido en que lo que ocurre en los materiales es lo siguiente: un electrón se encuentra en movimiento a través de la malla atrayendo iones positivos en forma muy ligera; pero causando vibraciones bastante tenues. A una unidad elemental de esta energía de vibración se le llama fonón, los electrones se atraen con espines magnéticos opuestos y un "momento" en tal dirección que son dos movimientos en sincronía.

Los electrones de un par pueden estar muy apartados uno del otro y además separados por otras partículas; pero éstos se encuentran indirectamente atraídos entre sí como si estuvieran encadenados, como si brincaran por encima de las otras partículas para poder estar unidos, de tal forma que cada uno de ellos se halla en movimiento constante, ocasionando choques ligeros entre sí y que hacia el exterior son cancelados debido a otras parejas que también se encuentran en movimiento. Además, los pares viajan como si todos estuvieran de acuerdo de tal forma que los electrones van rozándose ligeramente sus superficies como si se estuvieran moviendo en un ofuscamiento ordenado.

Los eslabones entre los electrones son tan tenues que permanecen intactos únicamente a bajas temperaturas, de igual forma ocurre conforme se incrementa poco a poco la temperatura en el material hasta llegar un momento en el cual los eslabones se rompen y el material pasa del estado superconductor a uno conductor, o sea cuando se llega a la T_c máxima del superconductor.

Ahora bien, esto puede ser algo más que estar llevando pares de electrones superconductores en el óxido, y de ser así, entonces se tendría que elaborar una nueva teoría o hacerle una extensión a la BCS con un mecanismo distinto de apareamiento de los electrones y que hasta ahora se desconoce.

El enfoque aquí presentado es el que básicamente ha dado principio a la explicación de la estructura de los compuestos superconductores a través de planos y cadenas.

En la estructura básica del compuesto YBaCuO que se muestra en la figura IV.8 se aprecia claramente que son dos los planos que hay en cada celda básica de un superconductor, formados por átomos de cobre y oxígeno y se encuentran arriba y abajo del átomo de Yttrio como si se tratara de un sandwich; y las cadenas, también constituidas por átomos de cobre y oxígeno están ubicadas a los lados de los átomos de Bario (dos cadenas por cada átomo).

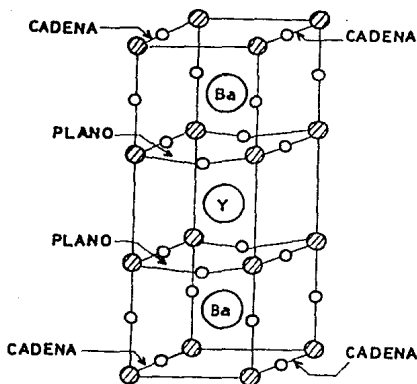


FIGURA IV.8. ESTRUCTURA BASICA DEL COMPUESTO YBaCuO QUE MUESTRA LOS PLANOS Y CADENAS QUE LA CONSTITUYEN.

De los estudios realizados en diferentes laboratorios de todo el mundo, los investigadores concuerdan en que son tres las principales características que hacen posible la superconducción en un material y estas son:

- 1) La formación de pares de electrones.
- 2) La cantidad de oxígeno que contiene cada celda.
- 3) Lo que ayuda a obtener temperaturas críticas de transición más elevadas es la cantidad de planos que hay en cada celda superconductora.

En conclusión: ningún metal en su estructura muestra estas características y por lo tanto se considera que no hay metales superconductores a alta temperatura.

Hasta hace algún tiempo se clasificaban a los materiales en tres grupos que eran: 1) aislantes (materiales como el vidrio que no permiten el flujo de corriente eléctrica); 2) semiconductores (materiales como el Si y el Ge que dependiendo de su polarización pueden permitir o no un flujo de corriente eléctrica); y 3) conductores (materiales como los metales que permiten el flujo de corriente eléctrica; pero que ésta es limitada debido a la presencia de una resistencia eléctrica). Ahora las cerámicas son un nuevo tipo de materiales y llegan a conformar el cuarto grupo dentro de la clasificación antes mencionada, y estos son "los superconductores" (materiales que permiten el libre flujo de corriente eléctrica sin presencia alguna de resistencia que pueda obstruir o limitar el paso de dicho flujo).

IV.4 LA IMPORTANCIA DEL OXIGENO

Como ya se mencionó anteriormente, la celda básica de un superconductor presenta una ausencia de átomos en la posición "X" (oxígeno) y además que para el compuesto $YBa_2Cu_3O_7$ se puede tener hasta "X" igual a siete. Para saber con exactitud la cantidad de "X" presente en el material se toma una muestra de éste y se realiza la termogravimetría que es un proceso a través del cual se analiza la masa de la muestra antes y después de ser sometida a una temperatura muy elevada, esto se puede hacer gracias a las propiedades térmicas del compuesto ya que durante el proceso de calentamiento la muestra pierde peso y esto proporciona la cantidad de oxígeno que contiene el compuesto. El procedimiento que se lleva a cabo es relativamente sencillo; pero lento, en el cual los pasos a seguir son los siguientes y además se muestran gráficamente en la figura IV.9.

- 1) Se tiene una muestra del compuesto a estudiar, en este caso $YBaCuO$.
- 2) Se pesa la muestra con la que se va a trabajar, registrando una masa de 56 gr. a temperatura ambiente.
- 3) La muestra se calienta en un horno durante dos días aproximadamente y se lleva hasta una temperatura de casi 1000C.
- 4) Se pesa nuevamente la muestra que para entonces ya ha perdido peso, debido a que durante el calentamiento el oxígeno se ha evaporado, ahora la muestra tiene una masa de 4.9 gr..
- 5) La diferencia de masas inicial y final proporciona la cantidad exacta de oxígenos que contiene el compuesto y en este caso es $X=6.5$.
- 6) Conforme se va enfriando la muestra, se sigue registrando su masa de tal forma que a una temperatura de 450C aproximadamente se tiene una masa de 5 gr., lo cual indica una concentración de oxígenos de 6.9 por celda; pero conforme sigue bajando la temperatura hasta su T_c , la muestra vuelve a registrar una masa de 4.9 gr igual que cuando se sacó del horno y por lo tanto, cuando se trabaja como material superconductor lo hace con un contenido de oxígenos de $X=6.5$.

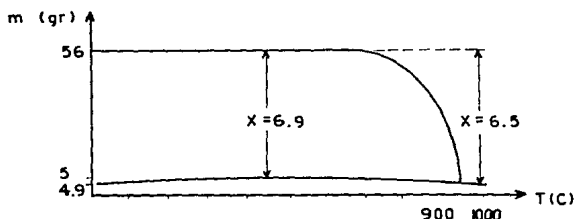


FIGURA IV.9. RESULTADOS GRAFICOS DE LA TERMOGRAVIMETRIA.

De la figura IV.9 y de la explicación del proceso de la termogravimetría se puede deducir que es de suma importancia que la muestra a analizar sea totalmente pura, ya que la presencia de partículas ajenas puede arrojar valores irreales en las mediciones y por consiguiente considerar una cantidad errónea de oxigenos en el compuesto.

Contando con el valioso auxilio de este método, el Dr. Anthony West de nacionalidad Inglesa tomó varias muestras del compuesto $YBaCuO$, cada una con distinta cantidad de "X". posteriormente las enfrió y midió la T_c de cada una de ellas; la siguiente gráfica (figura IV.10) muestra los resultados que obtuvo de su investigación; en ella se pone de manifiesto la gran importancia del oxígeno para los superconductores a alta temperatura.

Asimismo, para obtener un valor fiel de la T_c es fundamental el elemento que se utilice para bajar la temperatura de las cerámicas ya que aun cuando la mayoría de los investigadores emplea para ello (Ne) nitrógeno líquido, no es conveniente debido a que durante el tiempo que tarda la muestra en adquirir la temperatura del Ne, se forma una capa de gas del mismo elemento alrededor de la muestra actuando como un aislante que no permite al material adquirir la misma temperatura del nitrógeno líquido; además dicha capa permanece ahí durante todo el experimento y por consiguiente las lecturas de T_c que se registran no son precisas.

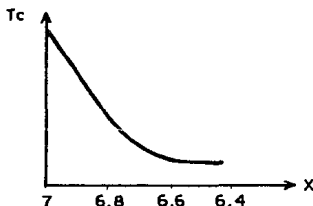


FIGURA IV.10. INFLUENCIA DEL OXIGENO EN LA ALTA TEMPERATURA DE LOS SUPERCONDUCTORES.

Para evitar este problema es más conveniente utilizar (He) helio líquido (3.45K) ya que ocasiona muerte instantánea y por lo tanto no da tiempo a formar capa alguna de gas alrededor de la muestra obteniendo con ello lecturas reales de T_c en los superconductores y que además es muy importante puesto que es la temperatura el principal problema a vencer para poder emplear a las cerámicas a nivel industrial.

IV.5 INVESTIGACIONES RECIENTES SOBRE OXIGENO, PLANOS Y CADENAS.

Nuevas cerámicas superconductoras pueden ayudar a elevar las T_c con muy baja resistencia eléctrica y sin perder la superconductividad, así los materiales que han ido descubriendo los investigadores son:

Los especialistas en materiales de Bellcore encontraron que el bismuto y el talio son materiales con dos fases de superconducción, de las cuales una alcanza los 85K mientras que la otra llega a 106K y esto depende únicamente de las localidades que ocupe el oxígeno en la celda; pero desafortunadamente la fase de más alta temperatura presenta problemas ya que la resistencia eléctrica en dicha fase es sumamente variable e incontrolable de tal forma que en determinado momento el material se comporta como superconductor y conductor.

Investigadores de IBM en Almaden y el centro de California se dieron cuenta que era posible controlar el número de planos en la estructura de los compuestos con talio, los experimentos hechos así revelaron que con dos planos se podía obtener una temperatura de 108K, haciendo una combinación de celdas de dos y tres planos ganaron 10K a la temperatura anterior y utilizando tres planos por cada estructura básica lograron alcanzar una T_c de 125K.

Conociendo los resultados de las investigaciones mencionadas, muchos investigadores se han avocado a realizar más trabajos con los compuestos de $YBaCuO$ y con los nuevos compuestos de $BiSrCaCuO$. Uno de los que continuó las investigaciones con $YBaCuO$ fue Goodenough encontrando a fines de 1988 que los compuestos con falta de oxígenos en $X=4$ son los de mayores perspectivas ya que plasmando sus resultados en una gráfica observó que a 60K ocurre un cambio en la muestra, presentándose gráficamente como una planicie a dicha temperatura (ver figura IV.11).

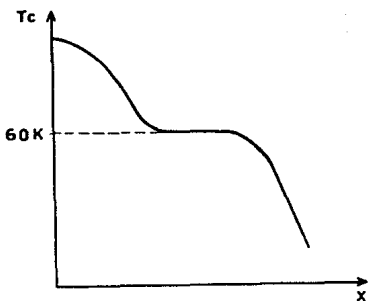


FIGURA IV.11. COMPORTAMIENTO DEL YBaCuO CUANDO PRESENTA AUSENCIA DE OXIGENOS EN $X=4$.

De la figura anterior se observa que precisamente a 60K hay en el compuesto otra estequiometría y que al cambiar la temperatura existe un reordenamiento de la malla. Goodenough y varios investigadores más continúan hasta el momento con estos estudios, ya que si esto es reproducible invariablemente, entonces es posible cambiar la estructura del compuesto por las vacantes, pudiendo tal vez reordenar la malla y con esto conseguir aumentar la T_c del compuesto.

Mientras tanto los ingleses Anthony West, John Irvine, John Binks y el coreano Chan Namgung, están dedicados a los experimentos con compuestos de bismuto, en particular Bi Sr Ca Cu O. Con este compuesto elaboraron varias muestras de las cuales consiguieron obtener una temperatura de superconducción a 120K.

C A P I T U L O V

APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

V.1 CLASIFICACION DE LAS APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Como ya se ha mencionado, los investigadores de todo el mundo están sumamente interesados en el desarrollo de nuevos materiales superconductores que alcancen cada vez más altas temperaturas críticas. Tanto países desarrollados como subdesarrollados han puesto en marcha proyectos nacionales de superconductividad que tienen como fin el estudio y las aplicaciones de estos nuevos compuestos que seguramente llegarán a ser de una enorme importancia económica en un futuro no muy lejano.

Entre los países subdesarrollados, destaca la participación de México, China y la India que cuentan con un programa de investigación que es bastante competitivo a nivel mundial.

Hablando de los países desarrollados; Japón tiene un programa nacional de superconductividad desde hace más de 25 años. Más recientemente los Estados Unidos, han emprendido también un programa nacional de superconductividad, el cual cuenta con dos grandes apoyos financieros; uno por parte del gobierno y el otro por compañías privadas.

Sin embargo, el esfuerzo económico más grande a nivel mundial no proviene de los gobiernos de los distintos países, sino de los industriales privados. De esta forma, varias compañías industriales de Japón, Estados Unidos y distintos países europeos realizan grandes esfuerzos para poder utilizar la superconductividad en aplicaciones industriales.

Las posibles aplicaciones de los materiales superconductores han sido clasificadas por los investigadores en tres grupos:

- 1) Producción de grandes campos magnéticos.
Grandes en cuanto a intensidad y espacio en el cual debe existir el campo, esto es debido a que muchas de las aplicaciones industriales necesitan de grandes campos magnéticos para poder obtener resultados favorables en las distintas áreas en que se pretenden utilizar y que más adelante se mencionarán.
- 2) Diseño y fabricación de cables de transmisión de energía eléctrica.
Aún cuando estos ya se manufacturan, actualmente no son competitivos comercialmente con respecto a los cables aéreos normales; donde las líneas de transmisión deben ser subterráneas, podría tenerse una cierta ventaja económica con la utilización de estos cables superconductores.

- 3) Diseño y construcción de dispositivos electrónicos.
Una de las principales intenciones de estos dispositivos electrónicos es la de utilizar la transición de estados normal-superconductor como un interruptor. Asimismo cabe mencionar que son de gran interés los dispositivos basados en la utilización del llamado efecto Josephson.

V.2 EFECTO JOSEPHSON

LA JUNTURA JOSEPHSON

La juntura Josephson está formada por dos electrodos superconductores y entre ellos una capa delgada de material aislante (figura V.1) a través de la cual fluye la corriente de superconducción generando un campo magnético, teniendo en cuenta que la corriente debe ser menor que la densidad de corriente crítica máxima que permita el compuesto superconductor utilizado.

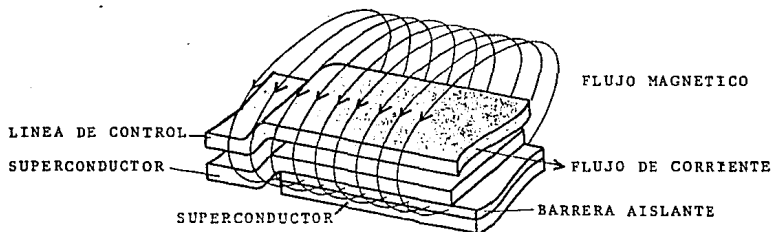


FIGURA V.1. JUNTURA JOSEPHSON.

NATURALEZA DEL EFECTO

El tunelamiento mecánico-cuántico de los pares de Cooper a través de la delgada barrera aislante (del orden de nanómetros) entre dos superconductores, fue teóricamente preestablecido por Brian D. Josephson en 1962. Josephson calculó las corrientes que podrían estar fluyendo durante una etapa superconductiva de tunelamiento, y además estableció que fluye una corriente de electrones apareados (supercorriente) junto con una corriente normal que resulta del tunelamiento de electrones impares. Josephson predijo específicamente que si la corriente no excede un valor límite (I_c) entonces no existe caída de voltaje a

través de la barrera tunel y a esto se le conoce como el efecto Josephson para DC. Además, Josephson también predijo que si se mantiene constante un voltaje distinto de cero a través de la barrera tunel, una supercorriente de alterna fluye a través de la barrera además de la corriente de DC producida por el tunelamiento de electrones impares:

La frecuencia de la supercorriente de AC está dada por una constante K_j llamada constante de Josephson y que está dada por el cociente de constantes fundamentales:

$$K_j = 2e / h$$

donde "e" es la carga del electrón y "h" es la constante de Plank. De manera que el efecto Josephson proporciona un estándar cuántico de voltaje que puede usarse para establecer la representación alternante, reproducible y uniforme del voltaje, y esto es en todo el mundo a través de la adopción internacional tomada por acuerdo para un valor convencional de K_j . El valor fue adoptado por el Comité Consultativo de Electricidad (CCE) y subsecuentemente por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) en 1988 después de un serio análisis hecho por un grupo especial de trabajo del CCE y dicho valor es:

$$K_j = 483597.9 \text{ GHz} \quad (\text{por volt exactamente})$$

j-90

el subíndice 90 indica que la nueva representación del volt estará vigente a partir del 1 de enero de 1990.

TEORÍA DEL EFECTO JOSEPHSON

El efecto Josephson se explica mejor en términos de conceptos básicos aplicados matemáticamente y de noción de ondas, por ejemplo, ondas senoidales que pueden tener la misma λ y la misma fase. Las fases de dos superconductores aislados están irrelacionadas, mientras que cuando dos superconductores hacen un contacto perfecto tienen la misma fase. Si los superconductores están conectados a través de una barrera aislante muy delgada, entonces las fases pueden ser diferentes pero no independientes. Si ϕ es la diferencia en fase de los superconductores en los lados opuestos de una juntura, entonces la corriente total que está fluyendo a través de la juntura queda determinada por:

$$I = I_0 + I \sin \phi$$

donde: I_0 es la corriente debida al tunelamiento de electrones impares.
 $I \sin \phi$ es la corriente debida al tunelamiento de pares de electrones.

En general las corrientes I_c , I_0 , I_1 están en función del voltaje de la juntura. Para un voltaje cero, la corriente I_0 también toma el valor de cero y la diferencia en fase (ϕ) de los superconductores es constante y por lo tanto el valor de la corriente I_1 depende únicamente de las propiedades de la juntura, así la supercorriente del voltaje cero es una función senoidal de la diferencia de fase que exista entre los dos superconductores. El máximo valor que puede tomar $\sin \phi$ es 1 y en este caso la corriente I_1 toma el valor de la corriente crítica (I_c) que permita la juntura con la cual se esté trabajando.

V.2.1 SQUID

El SQUID es un dispositivo que en su forma original consiste de dos junturas Josephson conectadas en paralelo en un superconductor, llamado dispositivo superconductor de interferencia cuántica (SQUID: superconductive quantum interference device). En el que una pequeña corriente aplicada I fluye a través de las junturas como una supercorriente sin generar una caída de voltaje. Sin embargo, cuando la corriente aplicada excede un cierto valor crítico (I_c) se genera un voltaje (V), entonces el valor de I_c es una función oscilatoria del flujo magnético ϕ con un periodo de un quantum de flujo que es aproximadamente 2.07×10^{-5} webbers, la oscilación se obtiene mediante la interferencia de dos ondas descritas por los pares de Cooper en las dos junturas, en una forma que es estrechamente análoga a las interferencias entre dos ondas electromagnéticas coherentes, por lo que el SQUID es considerado generalmente un interferómetro.

A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones que se han propuesto para cada uno de los tres grupos en que han sido clasificadas las aplicaciones de los materiales superconductores.

V.3 GRUPO 1 ELECTROIMANES Y MAGNETOMETROS SUPERCONDUCTORES

Algunas de las aplicaciones más importantes de los electroimanes superconductores son las siguientes:

- 1) **Biología.**
Es sabido que los campos magnéticos intensos afectan el desarrollo de las plantas y animales en su crecimiento, así que para realizar estos estudios podrían utilizarse los imanes mencionados creando con ellos grandes campos magnéticos.
- 2) **Química.**
En esta área los campos magnéticos cambian las reacciones químicas y también pueden emplearse en la catálisis (proceso por el cual la velocidad de una reacción química queda influida por una sustancia que permanece químicamente intacta).
- 3) **Medicina.**
Aquí se aplican campos magnéticos para arreglar arterias, secar tumores y sanar aneurismas (dilatación de venas y arterias) sin cirugía. También se estudia como son afectadas las funciones vitales del cuerpo humano al ser expuesto a campos magnéticos.
- 4) **Levitación.**
La idea primordial de esto es aplicarlo en el transporte masivo, rápido y económico (figura V.2); usando una fuerza magnética para levantar los vehículos y para conseguirlo se tienen dos métodos.

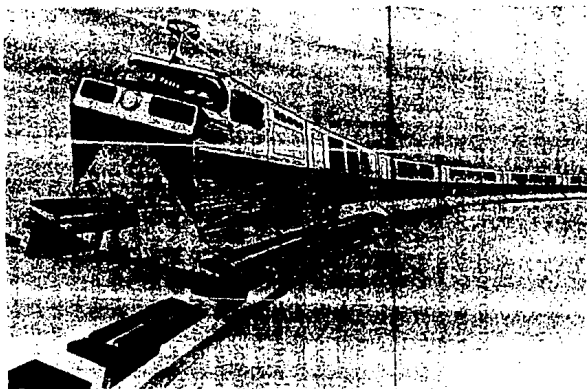


FIGURA V.2. MEDIO DE TRANSPORTE COLECTIVO EN LEVITACION.

El primero corresponde a la utilización de un sistema atractivo donde, la fuerza magnética entre un material ferromagnético colocado en el seno de un campo magnético es siempre atractiva.

El segundo se refiere a un sistema de levitación por repulsión, el cual funciona como una aplicación de la Ley de Lenz de inducción de corrientes eléctricas al tener campos magnéticos que varían con el tiempo y en cuyo interior existe una espira de material superconductor. El campo magnético que genera la corriente inducida propicia un campo magnético que tiene una polaridad opuesta al campo magnético original, creándose una repulsión entre ambos campos magnéticos.

Un punto importante de este sistema es que existe disipación de energía en el conductor debida a su resistencia eléctrica; pero si en lugar de conductores se utilizan superconductores, entonces no hay resistencia eléctrica y por lo tanto no hay disipación de energía, entonces el sistema de repulsión presenta mejores perspectivas que el sistema de atracción.

5) Separación magnética.

Se trata de separar: materiales paramagnéticos de materiales ferromagnéticos; sustancias magnéticas de la arcilla; y sustancias minerales de sustancias orgánicas.

6) Agua.

En aguas contaminadas es posible ionizar las impurezas contenidas en el agua y que al fluir a través de un campo magnético dichas partículas pueden ser desviadas y apartadas del líquido.

7) Aceleradores de mucha energía.

A nivel investigación ya se han realizado electroimanes dipolares y cuadrupolares oscilantes de materiales superconductores, los cuales son capaces de generar campos magnéticos tan intensos como nunca imaginados para usarlos en aceleradores de partículas de energías muy grandes.

8) Almacenamiento de energía.

Se trata de una aplicación a gran escala ya que el sistema podría servir para una gran variedad de propósitos importantes. Para valores adecuados del campo magnético se pueden almacenar grandes densidades de energía. Dependiendo del tiempo en el que pudiera realizarse la descarga de la energía eléctrica almacenada; una utilización de los electroimanes sería en reactores de fusión por ejemplo; pero la perspectiva más atractiva de estos sistemas sería el utilizarlos en las redes comerciales de distribución de energía eléctrica, sobre todo para el consumo en las horas pico de todas las urbes.

En este grupo es muy importante la presencia del SQUID, el cual tiene grandes aplicaciones en campos magnéticos. Hay dos tipos de dispositivos de interferencia cuantica en superconductores para detectar cambios en el flujo magnético, uno es el SQUID de CC y otro el SQUID de RF.

El SQUID de CC (corriente continua) opera con una corriente de polarización de DC y consiste de dos junturas Josephson, donde cada una de ellas queda en paralelo con una resistencia externa para eliminar la histéresis. Con la relación de características de corriente y voltaje, y el SQUID polarizado con una corriente constante entonces un cambio en el flujo magnético aplicado proporciona un aumento a la corriente correspondiente que genera un flujo magnético igual y opuesto en el SQUID. El SQUID es entonces un detector muy sensible de cambios de flujo magnético (magnetómetro) en un circuito de retroalimentación.

Por consiguiente sus usos abarcan desde aplicaciones militares hasta médicas; por ejemplo puede detectar submarinos al registrar cambios que estos ocasionan en el campo magnético de la tierra cercano a ellos; otro ejemplo es la detección de la circulación de la sangre cuando se le coloca cerca de un vaso sanguíneo ya que la sangre es magnética.

El SQUID de RF (radiofrecuencia) consiste en una juntura Josephson y opera con una corriente de polarización de RF. El SQUID está acoplado a una inductancia de un circuito LC excitado a su frecuencia de resonancia típicamente de 30MHz, aun cuando se han hecho pruebas satisfactorias a 10GHz. Cuando la amplitud de la corriente de RF se ajusta debidamente, el voltaje de RF oscila a través del circuito tanque como una función del flujo magnético aplicado y por consiguiente se tiene un detector de flujo magnético de alta sensibilidad.

Los magnetómetros SQUID de RF están tomando mucha importancia en diferentes áreas como lo son: en medicina haciendo la medición de señales magnéticas producidas por el corazón humano y el cerebro; en geofísica por ejemplo, en la medición de la susceptibilidad en rocas; asimismo se están aplicando en magnetotelerica; y como transductores para ondas gravitacionales.

V.4 GRUPO 2 CABLES SUPERCONDUCTORES

En la fabricación de cables superconductores es necesario tener en cuenta que actualmente las cualidades mecánicas de los materiales cerámicos son muy pobres. Sin embargo, se están haciendo estudios exhaustivos en todo el mundo para desarrollar tecnología que permita hacer alambres con estos materiales superconductores.

Para la construcción de cables superconductores se ha hecho una clasificación de tres grupos que dependen principalmente del aislamiento térmico que el cable necesita así como del sistema conductor eléctrico, los tres grupos de cables son: rígidos, semiflexibles y completamente flexibles, los cuales se describen a continuación:

1) RIGIDOS

El aislamiento y el conductor se fabrican con tubos rígidos; pero uno de los principales problemas que esto presenta es que la longitud máxima transportable de estos cables es de unos 20 metros aproximadamente, y que por consiguiente se necesitaría un gran número de uniones que podrían causar pérdidas en el transporte de energía.

2) SEMIFLEXIBLES

En este tipo de cables el aislamiento térmico también se fabrica con tubos rígidos aunque con componentes corrugados para compensar las contracciones térmicas. El sistema conductor para este caso es flexible y puede consistir de un tubo corrugado o de alambres doblados en forma helicoidal sobre un soporte cilíndrico hueco.

3) COMPLETAMENTE FLEXIBLES

En este caso, tanto el aislamiento térmico como el conductor son flexibles, de tal forma que el cable está construido con tubos corrugados de manera que no hay problemas ni con el transporte ni con las contracciones térmicas.

En los tipos de cables 1 y 2, los conductores pueden acomodarse en una envoltura térmica rígida común, de tal forma que no se tienen pérdidas térmicas. Esto está comprobado ya que los tipos de cable 1 y 2 se utilizan actualmente para la construcción de electroimanes de gran intensidad de campo magnético y en muy pocos casos para líneas de transmisión donde están operando adecuadamente.

V.5 GRUPO 3
APLICACIONES EN ELECTRONICA

El primer dispositivo que se propuso para aplicaciones en el campo de la electronica data de 1956 utilizando la transición del estado conductor al superconductor y dicho dispositivo recibió el nombre de criotron (figura V.2); el cual se trata de un par de alambres superconductores, uno enrollado alrededor de otro, uno de niobio alrededor de uno de tantalio con un aislante entre ambos.

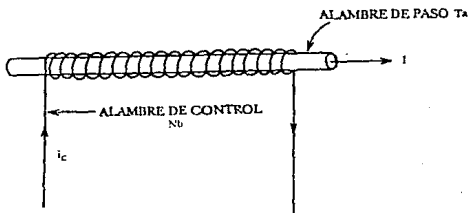


FIGURA V.3. ESQUEMA DEL CRIOTRON.

El campo magnético crítico del niobio es mayor que el de tantalio. Inicialmente los dos alambres se encuentran en estado superconductor; ahora bien, si pasa una corriente I por el alambre de tantalio que, al ser superconductor, no ofrece resistencia al paso de la corriente; y si se hace pasar una corriente I_c a través del alambre de niobio, se genera un campo magnético, dentro del cual queda el alambre de tantalio. Ahora bien, si la corriente es lo suficientemente intensa se puede generar un campo magnético que lleve al tantalio a su estado conductor. Si esto ocurre, aparece una resistencia eléctrica en el tantalio reduciendo por consiguiente la corriente eléctrica que fluye por él. Sin embargo, el alambre de niobio puede permanecer como superconductor ya que su campo magnético crítico es mayor que el del tantalio a la misma temperatura. Así es que el valor de la corriente en el alambre de tantalio se puede controlar con una corriente menor. El alambre de tantalio recibe el nombre de alambre de paso mientras que el de niobio recibe el nombre de alambre de control.

Por lo anteriormente expuesto, el alambre de paso debe escogerse de un calibre muy grande para poder tener en él la mayor cantidad de corriente.

Sin embargo a mediados de los 60's, estos dispositivos perdieron su interés debido a la aparición de los transistores, que son dispositivos que operan a temperatura ambiente.

Tal vez en un futuro no muy lejano los criotrones podrian volver a ser competitivos con los nuevos conductores cerámicos que cada vez tienen una más alta T_c .

También ocurrió que el descubrimiento del efecto Josephson y el desarrollo alcanzado en el campo de los circuitos integrados trajeron como consecuencia una magnífica perspectiva de aplicaciones de la superconductividad en la electrónica.

Las características del efecto Josephson son muy interesantes ya que en la juntura Josephson hay corriente de superconductividad aun en ausencia de un voltaje aplicado, en estas condiciones de voltaje cero la corriente Josephson depende fuertemente del campo magnético aplicado, lo que lleva a la posibilidad de tener un interesante interruptor para circuitos lógicos en las computadoras.

Otra gran aplicación de las juntas Josephson es en los dispositivos llamados SQUID que también funcionan como un elemento lógico en computadoras de alta velocidad. Cuando un SQUID sin carga alguna es polarizado correctamente con una fuente de corriente, la aplicación de un flujo magnético dispara una gran corriente desde el voltaje cero hasta un voltaje diferente de cero y esta función puede ser utilizada para desarrollar funciones lógicas.

Asimismo, el SQUID puede utilizarse como una memoria sin disipación, para almacenar "1's" y "0's" en función de la dirección de la supercorriente que circula a través del superconductor; esto se debe a que la corriente permanece circulando en una de las dos juntas y genera un momento magnético manteniendo una información almacenada; además, si en la otra juntura la corriente circula en sentido contrario a la primera, entonces el momento magnético es opuesto al inicial y de esta forma, si se tienen dos sentidos de circulación entonces se tienen dos estados de memoria (1 y 0).

Esto tiene una gran importancia y un enorme futuro, debido a que en las computadoras la ejecución de una instrucción elemental se lleva de 1 a 10 ciclos. Actualmente un ciclo de operación oscila en un rango de 12 a 60 nanosegundos mientras que, utilizando las juntas Josephson, los ciclos de operación se reducen tanto que son del orden de 5 a 10 picosegundos.

V.6 CARACTERISTICAS QUE DEBEN CUMPLIR LOS SUPERCONDUCTORES COMERCIALES

A continuación se ennumeran las principales características que requieren poseer los superconductores para utilizarse comercialmente:

- 1) Alta temperatura crítica de transición (T_c).
La temperatura más alta que sea posible obtener ya que esto hará que la temperatura de operación del dispositivo fabricado también sea alta, reduciendo con esto los costos de enfriamiento que se requieran para alcanzar el estado de superconducción y así poder operar.
- 2) Elevado campo magnético crítico (H_c).
Dado que se pretende utilizar superconductores para generar campos magnéticos muy intensos, entre mayor sea el campo magnético que se desee generar, mayor tendrá que ser el campo crítico que permita al material permanecer en el estado de superconducción.
- 3) Elevada corriente crítica (I_c).
Esto se debe a que a mayor densidad de corriente crítica que la muestra pueda soportar antes de pasar al estado de conducción, más pequeño puede hacerse el dispositivo y por consiguiente el costo que esto implica también se reduce.
- 4) Gran estabilidad.
Comunmente ocurre que los superconductores son inestables bajo cambios repentinos de corriente, de campos magnéticos, o de temperaturas, y hasta por la misma degradación del material al transcurrir el tiempo. Así que, si ocurre algún cambio repentino cuando el dispositivo está en operación, podría perderse la superconducción ocasionando con esto un problema mayor en el sistema donde se encuentre operando el dispositivo en cuestión, por lo tanto debe tenerse la mayor estabilidad posible.
- 5) Facilidad de fabricación.
Un material superconductor como cualquier otro que deba utilizarse en aplicaciones comerciales, significa que tendrá que fabricarse en grandes cantidades y esto no será posible si su proceso de fabricación es muy complicado.
- 6) Costo mínimo.
El costo de fabricación, operación, mantenimiento y reposición que puede llegar a tener cualquier material empleado en ingeniería siempre debe ser tan bajo como sea posible y los superconductores de ninguna forma son la excepción.

V.7 ESTADO DEL ARTE EN LA INVESTIGACION DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Las cuatro grandes áreas de las investigaciones recientes en todo el mundo en el campo de los superconductores son:

- I PREPARACION O MANUFACTURA
- II PROPIEDADES FISICAS (Ic, Tc, Hc)
- III PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS
- IV DISPOSITIVOS Y APLICACIONES

Algunas de las investigaciones más recientes en cada uno de los puntos mencionados se citan a continuación:

I PREPARACION O MANUFACTURA

Para la utilización de los compuestos superconductores es de suma importancia la elaboración de estos, ya que en gran medida sus características de Tc, Ic y Hc dependen del proceso de preparación que se siga en la obtención del compuesto.

- a) Formación de películas delgadas de alta Tc con elementos organo-metálicos.

Laboratorio de Investigación Naval.
Washington D.C., U.S.A.

Durante el crecimiento de películas delgadas organo-metálicas de YBaCuO, se encontraron substratos ricos en oxígeno; estas películas mostraron comportamiento de semiconductor en altas Tc desde 80 hasta 36K.

- b) Preparación, distribución, trayectorias y propiedades de películas delgadas con YBaCuO.

Laboratorio de Investigación de Phillips.
Eindhoven, Holanda.

Descubrimiento de alta Tc en substratos de películas delgadas superconductoras, para la producción de triodos mediante electrodeposición y aleaciones con substratos de diferente estructura y con un espesor de 5 um.

- c) Pretratamiento y sinterizado de óxidos superconductores de YBaCuO.

Instituto Nacional de Investigación.
Tsukuba, Japón.

Estudio del comportamiento de los diferentes óxidos superconductores en función de la presión del sinterizado con especial atención que se ha puesto a los procedimientos de mezcla de los polvos y medida de las partículas; se descubrió que a baja temperatura aumenta la cantidad de oxígeno en los polvos calcinados de la sinterización.

- d) Superconductores de película YBaCuO preparados mediante la técnica de inmersión en sustratos de MgO.

Universidad de Tokio.
Tokio, Japón.

La preparación de película superconductora de alta Tc con un compuesto de YBaCuO con diferentes valores de óxido de cobre mediante la técnica de inmersión de sustratos a modo de adquirir propiedades de adhesión en la microestructura de estas películas que dependen fuertemente de las condiciones del tratamiento térmico que se haya dado a la muestra.

- e) Síntesis química de óxidos superconductores de alta Tc.

Laboratorio de Tecnología Industrial.
Hsinchu, Taiwan.

Se prepararon combinaciones de YBaCuO y LaBaCuO mediante un procedimiento químico de alto grado de homogeneización de proporciones variables, consiguiendo superconductividad a 97.5K y respuesta momentánea a 100K. Obteniendo respectivamente con éstos: susceptibilidad magnética y resistencia con resultados similares.

- f) Preparación de películas delgadas de superconductor con BiSrCaCuO mediante electrodeposición.

M. I. T.
Cambridge M.A., U.S.A.

Películas delgadas de BiSrCaCuO han sido preparadas reproduciblemente, mediante reactivos magnéticos en el control del electrodeposito, utilizando tres objetivos metálicos diferentes (Sr, Ca y Cu-Bi). El oxígeno se introdujo directamente en el sustrato durante el crecimiento de la película. Las películas se depositaron a temperatura ambiente en los sustratos, encontrándose un aumento de la temperatura en función

del oxígeno y del espesor; después del electrodeposito las películas se alearon a 900C dentro de un flujo de oxígeno. La resistencia de las mejores películas disminuyó linealmente con la temperatura hasta la salida de la superconducción a 85K.

- g) Trayectorias directas con rayo laser en cerámicas superconductoras de YBaCuO.

Universidad Johannes Kepler.
Linz, Austria.

Se realizaron investigaciones con la utilización de rayo laser para producir oxidación en compuestos de YBaCuO, se encontró que varía el contenido de oxígeno en el material y se puede incrementar localmente mediante el calentamiento con rayos laser inducidos. La radiación laser en una atmosfera de oxígeno cambia las características del material y permite la marca de trayectorias superconductoras en la superficie.

- h) Crecimiento y proceso de un solo cristal superconductor de YBaCuO.

Universidad de Illinois.
Urbana Illinois, U.S.A.

Se descubrió un método para crecimiento de cristales de YBaCuO cuyas condiciones fueron desarrolladas para mejorar la transición súbita en la temperatura, aquí se observaron cambios de susceptibilidad magnética asociados con la resonancia nuclear magnética.

- i) Degradación de las propiedades de sinterización y superconducción de partículas muy finas de YBaCuO al exponerse éstas a la humedad.

Departamento de Investigación y Desarrollo Central de Dupont.
Wilmington D.E., U.S.A.

Los efectos de temperatura ambiente y humedad en partículas finas de YBaCuO han sido estudiadas y se encontraron reacciones negativas en función de la humedad, detectadas por la difracción de los rayos x y el barrido con el microscopio electrónico, se descubrieron cambios rápidos en menos de 48 hrs. y después fueron relativamente lentos.

La sinterización y las propiedades superconductoras (exclusión del flujo magnético) del polvo, también se degradaron rápidamente en un principio y las degradaciones subsecuentes fueron relativamente más lentas, lo que sugiere que la reacción en la superficie es responsable de la degradación de las propiedades superconductoras.

II PROPIEDADES FISICAS

II.1 TEMPERATURA CRITICA

- a) Sistemas superconductores con la combinación BiSrCaCuO con T_c de 80 y 107K.

Laboratorio Central de Investigación de la Matsushita Electric Co. Ltd.
Osaka, Japon.

Temperaturas críticas de 80 y 107K se confirmaron mediante medidas de resistencia e inductancia y mediante el efecto Meissner. Se descubrió difracción de electrones mediante rayos x y análisis de microscopia electrónica.

- b) Alta T_c en superconductores de LaBaCuO con $R=0$ y $T_c=92K$.

Departamento de Física aplicada de la Universidad de Tokio.
Tokio, Japon.

Muestras de LaBaCuO se han sinterizado y muestran una T_c superior a 90K; una de las muestras presenta una transición superconductor a 93K y con una $R=0$ una temperatura $T_c=92K$.

- c) Superconductividad con Bi Sr Ca Cu O
($y=0.1, 0.125, 0.15$).

Centro de Investigación de la Mitsubishi.
Yokohama, Japon.

Susceptibilidad y resistividad magnetica en la muestra expuesta, en la que se han medido y encontrado difracción de rayos x donde $T_c=75K$; y cuando se disminuye la concentración de Ca aumenta la superconductividad donde T_c es mayor de 100K.

- d) Superconductor con el compuesto BiCaSrCuO a 110K.

Instituto Nacional de Investigación para Metales.
Tokio, Japon.

Encontraron un compuesto nuevo con la combinación BiCaSrCuO que tiene una estructura diferente a los 80K. Conforme la temperatura aumenta, cambia nuevamente la fase y se llega a una T_c de 110K.

- e) Superconductor (TlBaCa)CuO a 120K.

Laboratorios Sandia Nat..
Albuquerque N.M., U.S.A.

Los investigadores reportaron que utilizando un compuesto que contiene talio, calcio, bario, cobre y oxígeno, encontraron una fase de superconducción, la cual muestra diamagnetismo perfecto a 120K con una muy pequeña presencia de resistencia, y con resistencia cero una temperatura de casi 120K.

- f) Superconductor TlBaCaCuO.

Laboratorio Fujikura Ltd..
Tokio, Japón.

Sistemas superconductores de TlBaCaCuO mostraron propiedades de superconducción con $R=0$, obteniendo con ello funcionamiento superconductor a una $T_c=118K$ con sinterizado a 880C durante una hora.

- g) Alta temperatura de superconducción con Y A Ba Cu O
donde $A=In, Tl$.

Departamento de Ingeniería en la Universidad Warcuick.
Coventry U.K., U.S.A.

Se hizo una variante al tradicional compuesto YBaCuO, disminuyendo su concentración de Ytrio y en la misma proporción, aumentando Indio y posteriormente talio ($\times 0.6$), obteniendo con esto una $T_c=111K$ para el talio y $T_c=90K$ para el indio.

- h) Gran superconductividad a 125K con TlBaCaCuO.

Centro de Investigación de IBM.
San José C.A., U.S.A.

Se presenta un cambio brusco a la superconductividad con el compuesto antes mencionado a una $T_c=125K$ y $R=0$, dicha temperatura crítica oscila entre 118 y 125K dependiendo de las condiciones de preparación de la muestra.

- i) Fase superconductor en un compuesto de BiSrCaCuO a 105K.

Departamento de Física Aplicada
Lett, Japón.

Los autores reportan una fase superconductor a 105K con material cristalizado a 883C y composición química relativamente homogénea.

- j) $R=0$ con $T_c=100K$ en un superconductor de $GdBaCuO$.

Departamento de Química de la Universidad de Alabama.
Tuscaloosa A.L., U.S.A.

En el compuesto antes mencionado, se detectó superconductividad mediante métodos de medición de resistencia eléctrica en AC y DC; para ambos casos la T_c es de $108K$; pero con $R=0$ se tiene $T_c=100K$ para DC y $T_c=99K$ para AC.

- k) Alta T_c de superconductividad en una nueva fase mixta de $YBaAlCuO$.

Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM.
México D.F., México.

Se observó una transición a la superconductividad, mediante mediciones de resistencia en el nuevo compuesto $YBaAlCuO$ a una $T_c=90K$, con la ventaja de que dicho compuesto es totalmente reproducible.

- l) Superconductores de $BiSrCaCuO$ con $R=0$ y temperaturas superiores a los $110K$.

Departamento de Física de la Universidad Tsinghua.
Beijing, China.

Estos compuestos fueron preparados mediante las técnicas de reacción de estado sólido; la transición a la superconductividad se presenta a $125K$ y la resistencia de las muestras presenta una caída aguda aproximadamente al 98% cerca de la T_c (aproximadamente a una temperatura de $111K$).

II.2 CORRIENTES Y CAMPOS CRITICOS

- a) Altas I_c en superconductores de $YBaCuO$.

Laboratorios ATT Bell.
Murray Hill N.J., U.S.A.

La nueva microestructura muestra mejoras considerables bajo los siguientes datos: a una $T_c=77K$ y $H=0$, se obtiene $J_c=17000 A/cm$ y aproximadamente para la estructura sinterizada con alta dependencia en el campo magnético de J_c (problema de encadenamiento débil) ya no existe en este nuevo material.

La mejora en J_c se atribuye a la combinación de efectos de densificación, alineamiento de cristales y a la formación más limpia de las bandas.

- b) Posible existencia de límites geométricos intrínsecos para las I_c dentro del $YBaCuO$.

Centro de Investigación de las Tres Bases de Temperaturas
en el CNRS.
Grenoble, Francia.

Se obtuvo magnetización irreversible de cristales de $YBaCuO$ de diferentes medidas y se compararon con otros resultados; concluyendo, que aún cuando los cristales superconductores contienen barreras normales o encadenamientos débiles que limitan fuertemente la escala espacial de las supercorrientes, las barreras podrían asociarse con la posibilidad de una descomposición de los cristales estequiométricos y la baja concentración del oxígeno.

Supercorrientes de aproximadamente 4×10^6 A/cm a una temperatura de 4K estarán contenidas en las regiones de los cristales.

- c) Flujo en oscilaciones a baja temperatura con resonancia paramagnética de superconductores.

Universidad Hyderabad.
India.

Se reporta una señal de microondas que llega mediante la excitación del $YBaCuO$ a través de las frecuencias de microondas de 9.2 GHz, que desvanece la temperatura $T_c = 92K$ muy cerca de T_c si se considera que la señal varía de $(T_c - T)^{2.7}$, el exponente de la intensidad en la señal de microondas indica que a diferentes transiciones de temperatura cada conjunto de muestras tiene diferentes valores.

- d) Alta densidad de corriente a 50K.

Laboratorios ATT Bell.
Murray Hill N.J., U.S.A.

Se hicieron crecer películas delgadas de superconductor en un sustrato de $SrTiO_3$ mediante un nuevo proceso de solidificación. Un conjunto de metales con $YBaCuO$ derretido, se cubre con sustrato in situ y se oxida; obteniendo así una película superconductora, la cual presenta una densidad de corriente I_c de 10^6 A/cm a una temperatura de 50K.

II.3 JUNTURA JOSEPHSON

- a) Efecto tunel en superconductor de alta T_c con el compuesto $YBaCuO$.

Laboratorio de Investigación de Phillips.
Eindhoven, Holanda.

Los investigadores del laboratorio mencionado, han efectuado mediciones en junturas hechas en una superficie pulida de $YBaCuO$ con una capa de plomo como contraelectrodos. Observaron un efecto de características tunel con una energía superconductor de 6 meV. Este valor es pequeño; pero es consistente con la gama de la reflectividad infraroja.

- b) Modelo de I_c en un modelo granular de juntura Josephson.

División de Tecnología Electromagnética.
Boulder C.O., U.S.A.

Los investigadores calculan J_c en un superconductor granular en campos magnéticos de aproximadamente 5×10^4 Gauss. La dependencia del campo en esta región se presume que está controlada por las junturas Josephson intergranulares. Se obtienen varios modelos de cálculo para entender el transporte de I_c en un superconductor de cerámica $YBaCuO$, cuyo promedio de la dimensión del grano ligeramente excede los 10 μm . Los resultados llevan a un área crossccional promedio de 4.6 μm^2 . Si las junturas son en los límites de los granos, la profundidad de penetración es de aproximadamente 150-300 μm .

Se concluye que las junturas Josephson tienen un límite de transporte de I_c en estas muestras y están en los límites de los granos.

- c) Contactos superconductores de $YBaCuO$ en campos magnéticos.

Instituto Angewandte de Física de la Universidad de Hamburgo.
Alemania Occidental.

La resistencia de contacto R_c de un contacto de oro, difundido y presionado en un policristalino $YBaCuO$, se pierde a temperaturas por debajo de los 90K.

La carencia de una caída de voltaje sobre los contactos a corriente finita, sugieren fuertemente un par tunel entre el superconductor de alta temperatura y la capa adyacente de oro, convirtiéndose en superconductor por la vía del efecto de proximidad. Además, el análisis revela una estructura en los puntos de contacto en lugar de un área de contacto homogénea. Los contactos revelan corrientes altas hasta de 19 Amperes a

diferentes temperaturas y campos magnéticos, manteniéndose en estado superconductor con el campo magnético externamente aplicado (B), hasta $B=30$ mT, R_c aumenta con el campo hasta $R_c=180$ Ω con un campo aplicado externamente de 100 mT.

Este contacto de baja resistencia persiste hasta $B=10$ T, habiendo la posibilidad de diseñar dispositivos de alto campo magnético con una disipación de potencia prácticamente insignificante.

- d) Efectos de la juntura Josephson a 77K en los límites de grano en un puente hecho de película gruesa.

Universidad Tecnológica de Niigata.
Niigata, Japón.

Utilizando un método de impreso con pantalla de YBaCuO en películas de aproximadamente 30 μ m y una medida máxima de grano de 70 μ m, con una capacidad de trabajo de: $T_c=90.7$ K, $J_c=20$ A/cm a una temperatura de 77K. Los dispositivos mostraron claramente pasos Shapiro y trayectorias SQUID.

- e) Junturas superconductoras de metal y cerámica (YBaCuO) en campos de radiofrecuencia (RF).

Laboratorio de Física y Materiales a Baja Temperatura.
Ukrania, U.R.S.S.

Se hicieron mediciones de corriente y voltaje para junturas de un superconductor (T_a , Sn) y el metal normal (Cu) con un superconductor de cerámica (YBaCuO). Los pasos de corriente debidos al efecto no lineal de la juntura Josephson se observan bajo la radiación de RF. Cada juntura estudiada tiene una corriente baja y un exceso de corriente a un voltaje bajo máximo de la juntura Josephson. Para las junturas de cerámica y cobre, los pasos de corriente tienen una pendiente finita y existen hasta una temperatura de 77K.

- f) Asimetría en la juntura túnel entre un superconductor de alta temperatura y metal normal.

Instituto H. C. Oersted.
Copenhague, Dinamarca.

Para una corriente de polarización con electrones moviéndose de un estado superconductor a uno de metal normal, la corriente es cuadrática con el voltaje de polarización, y en el caso opuesto, con electrones moviéndose del metal normal al superconductor la corriente es lineal.

III PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS

El conocer las propiedades físicas y químicas de los materiales superconductores, resulta de suma importancia ya que hacen una enorme contribución al mejor entendimiento de su funcionamiento y su naturaleza, y entre mejor los podamos conocer y entender, asimismo se avanzará más en la aplicación tecnológica de los superconductores cerámicos.

a) Superfluidez modelable.

Universidad de Columbia.
Columbia N.Y., U.S.A.

Se desarrollaron los detalles técnicos de una nueva propuesta, donde es posible que solitones no topológicos sean relevantes a la superconductividad de alta temperatura. Niveles de energía en termodinámica presentan una fase de transición y superfluidez modelable.

b) Interacciones de electrón-excitón en la formación de pares de Cooper en las regiones internas de superconductores de alta temperatura.

Instituto de Física y Bajas Temperaturas.
Ukrania, U.R.S.S.

Existe la posibilidad de un espacio real, formado entre el espacio de los pares y los huecos en las cuasimoléculas de las cadenas deficientes en oxígeno de los superconductores de $YBaCuO$, además, la superconductividad se obtiene como resultado de la hibridación de los pares con las bandas portadoras en el sistema de dos componentes, obteniendo pares locales en las cadenas y capas conductoras de electrones sobre el cobre y el oxígeno.

c) Teoría macroscópica de superconductores con pequeña longitud de coherencia.

Laboratorio de Física del Instituto de Moscú.
Moscú, U.R.S.S.

En superconductores de alta temperatura, la longitud de coherencia no es mucho mayor que la distancia interatómica, por esta razón las fluctuaciones son más importantes aquí que en los superconductores comunes. Adicionalmente los superconductores de alta temperatura son fuertemente anisotrópicos.

d) Superconductividad en cristales de YBaCuO.

Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Stanford.
Stanford C.A., U.S.A.

Se descubre la interacción entre dos electrones en las cerámicas de un plano conductor polarizable; se observa que la zona conductora es mayor en las separaciones grandes siempre y cuando la polarización sea suficientemente grande, considerando tal interacción se observa una variación de la teoría BCS, basada en la compresibilidad del compuesto YBaCuO y su estructura electrónica. No hay densidad de carga, tampoco inestabilidad en la onda. Sin embargo, permitiendo las diferencias en fase, los parámetros varían de acuerdo con las líneas de Fermi separadas por pares de electrones suficientemente grandes comparadas con la muestra, quedando únicamente la interacción atractiva entre electrón y electrón.

Mientras se aumenta la polarización desde cero hasta los 90K, se obtiene la superconductividad en los planos de cobre y oxígeno, los pares de Cooper correspondientes están asociados más en la temperatura normal que en la inversión. Los pares de electrones se mueven a lo largo con las terceras líneas de pares de electrones, esta situación particular donde $l=3$ (línea), entonces los electrones se mueven en conjuntos de tres pares; pero donde $l=2$ y $l=4$ los estados superconductores tienen pares sencillos.

e) Correlación entre las bandas de electrones y las capas de pares en superconductores de alta temperatura.

Departamento de Física de Tecnología.
Haifa, Israel.

La conducción de electrones en YBaCuO muestra derivaciones en las órbitas; los electrones se mueven en una banda pequeña de aproximadamente 0.1 eV, los pares de Cooper en el estado superconductor vienen de dos planos de cobre y oxígeno diferentes y se asocian (juntan), lo que los atrae fuertemente es el modo de transferencia de carga dentro de un complejo interplanar. Debido al apareamiento de electrones de diferentes planos, se da la repulsión de Coulomb entre ellos mismos; pero ésta es pequeña y no afecta a la superconductividad.

IV DISPOSITIVOS Y APLICACIONES

El descubrimiento de materiales superconductores con T_c 's superiores a los 90K ha desarrollado diferentes aplicaciones. Las propiedades superconductoras de más interés para aplicación son: 1) $R=0$, y 2) efecto Meissner.

- a) Magnetómetro superconductor a la temperatura del nitrógeno líquido.

Academia de Ciencias de la U.R.S.S.
U.R.S.S.

Un magnetómetro con superconductor de interferencia que opera a las temperaturas del nitrógeno líquido, está hecho para medir campos magnéticos muy pequeños, registrando hasta un máximo de 10 uGauss. Las características de este acoplamiento del interferómetro con campos magnéticos pequeños son similares a la juntura Josephson.

- b) Dispositivos híbridos con superconductores y semiconductores (circuitos y sistemas).

Universidad de California.
Berkeley C.A., U.S.A.

Se hacen estudios en algunas formas de combinar circuitos híbridos de superconductores y semiconductores para la operación de una temperatura de 45K, que es aproximadamente la mitad de la T_c del YBaCuO; esto se desarrolla con superconductores de la misma familia y dispositivos semiconductores que operan mejor a 45K que a temperatura ambiente.

Algunos dispositivos se hacen con los nuevos superconductores y trabajan en un buen punto de operación; además las hibridaciones a los diferentes niveles con ambos dispositivos sirven para hacer circuitos y sistemas.

- c) Aplicación potencial de los superconductores de alta temperatura en la función de energía magnética.

Universidad de Illinois.
Urbana I.L., U.S.A.

Se hace una investigación acerca de la posible aplicación de superconductores de alta temperatura para la obtención de fusión magnética; donde los dos principales beneficios son: 1) que las temperaturas extremadamente altas y el campo de estos materiales permiten la aplicación de campos magnéticos muy altos; y 2) que los valores de T_c permiten una operación muy cercana a la temperatura del nitrógeno líquido.

- d) Aplicaciones en el aeroespacio de la superconductividad a altas temperaturas.

Laboratorio de Investigación de la Lockheed.
Palo Alto C.A., U.S.A.

Sensado, discriminación y proceso de señales con materiales superconductores entre los instrumentos de aviación. La existencia de superconductores con T_c 90K, implica dispositivos que operan a temperaturas del orden de los 45K y esto abre un potencial variado de aplicaciones dentro de la industria de la defensa aeroespacial. Esto es en parte debido a la existencia de tecnologías bien desarrolladas dentro de la criogénica para alcanzar estas temperaturas, y parcialmente debido a la operación actual de algunos componentes especializados a temperaturas extremadamente bajas.

En particular, componentes superconductores de alta temperatura pueden utilizarse como sensores adicionales de un sistema de aviación de alta complejidad, utilizando las bajas temperaturas durante los vuelos de gran altitud. Se establecen técnicas para el enfriamiento a 50K mediante la utilización de nitrógeno líquido o criogéno sólido o refrigeradores mecánicos.

- e) Superconductores a base de óxidos de película delgada.

Instituto de Investigación de los Países Bajos.
Amsterdam, Holanda.

Aplicaciones posibles de materiales de película delgada, las cuales incluyen dispositivos que utilizan el efecto Josephson y la cuantificación de flujo para reemplazar a los superconductores clásicos.

Una aplicación muy importante es precisamente el SQUID, aún cuando la construcción y las características de este dispositivo con películas delgadas aún se discuten, particularmente en las propiedades de ruido.

- f) Aplicación macroscópica de magnetos superconductores y cables de potencia de poca pérdida.

Furukawa Electric Co.
Yokohama, Japon.

Con la teoría BCS elaborada desde los años 50's, se estudian nuevos materiales y superconductores aplicables; y la superconductividad aplicable ha sido particularmente en aplicaciones macroscópicas para magnetos superconductores. La aplicación macroscópica de óxidos superconductores es importante, ya que aplicaciones de superconductores de alta temperatura se encuentran en una posibilidad macroscópica de superconducción.

ESTA COPIA NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

sin embargo el mayor problema técnico es que el óxido superconductor tiene una I_c muy baja y por consiguiente una baja densidad de corriente.

- g) Dispositivos superconductores de conmutación de alta I_c y con ultra velocidad electrónica.

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Computación de la
Universidad Norman.
Oklahoma, U.S.A.

Superconductores de alta temperatura y película delgada, de aproximadamente 100K, permiten las combinaciones de superconducción y semiconducción para dispositivos electrónicos utilizados en experimentos e investigación, como una forma de realizar circuitos de integración a alta escala. Mejorando así la velocidad de transmisión de información, incorporando para este material superconductor a la estructura comercial de integración que será el mejor enfoque para desarrollar dispositivos híbridos VLS y haciendo los análisis de hibridación pasiva (utilizando interconectores de superconductores) de dispositivos semiconductores. Además se estudian los esquemas de hibridación con el propósito de obtener transistores de alta velocidad resonante en modo túnel.

CONCLUSIONES

El fenómeno de la superconductividad es sin lugar a dudas el descubrimiento del siglo en el mundo de la ciencia, y los materiales superconductores tienen una cantidad de aplicaciones tan grande que dentro de muy poco tiempo la forma de vida de la humanidad se verá grandemente afectada por el uso de dichos materiales.

Una aplicación sumamente interesante y versátil de los superconductores es la juntura Josephson y más aun los dispositivos llamados SQUID que están formados a base de junturas Josephson; el SQUID, de alguna manera se está convirtiendo en el dispositivo multiusos de la superconductividad, ya que bien se puede encontrar operando como magnetómetro de CC, como magnetómetro de RF, desarrollando funciones lógicas y hasta como un elemento de memoria.

Actualmente la naturaleza de los superconductores cerámicos presenta problemas en su aplicación ya que se trata precisamente de materiales cerámicos y que por lo tanto son frágiles, mientras que lo que se necesita es sin duda alguna todo lo contrario, o sea, un material dúctil, fácil de conformar, que con él se pueda hacer alambre, hojas, láminas, etc..

Ahora bien, algunas de las aplicaciones utilizan capas superconductoras muy delgadas encima de sustratos aislantes, y para hacer esto ya existen varios métodos con los que se cuentan para trabajar; uno de ellos es por ejemplo la simple salida de vapores en el vacío a partir de un gas ionizado. Para poder hacer alambre se hacen estudios donde tal vez sea posible lograrlo, si primero se introduce polvo superconductor en un tubo y después se reduce poco a poco el diámetro del tubo mediante una técnica de trefilado para comprimir los polvos que se encuentran en el interior.

En conclusión, se puede decir que el éxito de la aplicación de los nuevos superconductores depende fuertemente del desarrollo de técnicas de fabricación apropiadas más que de un conocimiento profundo del comportamiento de los superconductores a un nivel estructural. Y aunque en este momento los compuestos superconductores de más alta temperatura son cerámicos, hay que tener en cuenta que muy probablemente aquellos que proporcionen temperaturas más elevadas hasta llegar a trabajar a temperatura ambiente, resulten no ser compuestos cerámicos, sino que se trate de nuevos materiales completamente distintos.

BIBLIOGRAFIA

1. Sybil P. Parker
Encyclopedia of Electronics and Computers
Mc Graw-Hill, New York, 1984
2. A. C. Rose-Innes, E. H. Rhoderick
Introduction To Superconductivity
Pergamon Press Ltd., Oxford, 1978
3. Luis Fernando Magaña Solis
Los Superconductores
Fondo de Cultura Económica, México D.F., 1988
4. Robert M. Hazen
Perovskites
Scientific American, pp 52-61, junio 1988
5. Karen Fitzgerald
Fact vs. Fancy
IEEE Spectrum, pp 30-41, mayo 1988
6. George C. Short
Mejoran las Perspectivas de la Superconductividad
Ingenieria, pp 35-37, enero-marzo 1989
7. Un Centre Looks For Answers Beyon Year 2000
update, pp 1-2, junio 1988
8. New Materials Challenge Asian Development
Atas News, p1, junio 1988
9. Gina Maranto
Superconductivity: Hype vs. Reality
Discover, pp 22-32, agosto 1987
10. Daniel Tarnowski
El Descubrimiento de la Superconductividad a Alta
Temperatura
Mundo Cientifico, pp 284-292, 1987
11. Davis Stephen G.
The Superconductive Computer In Your Future
Datamation, pp 74-77, 15 agosto 1987
12. Kneale Dennis
Superconducting "thin film" test IBM's talent, patience
Wall Street Journal, p23 p29, 11 septiembre 1987
13. Teri Robinson
U.S. Forges Research Pact With Japan For Star Wars
Mis Weck, p4, 27 julio 1987
14. Superconductors Promise
World Press Review, p54, septiembre 1987

15. Lori Valigra
MITI grabs for superconductor edge: seeks equal funding for materials research and device development
Computerword, pp 91-92, septiembre 1987
16. K. A. Müller, J. G. Bednorz
The Discovery Of a Class Of High-Temperature Superconductors
Science, pp 1115-1117, septiembre 1987
17. Arthur L. Robinson
Neutrons clarify superconductors, neutron scattering experiments reveal a two-dimensional antiferromagnetic behavior that is consistent with an electron spin model of high-temperature superconductors
Science, pp 1115-1117, septiembre 1987
18. James Gleick
Superconductors: scientist hail latest materials: relatively common substances show potential for wires and electronic applications
New York Times, p15, 8 marzo 1988
19. John Tunney
Superconductivity bill of to congress
American Metal Market, p4, marzo 1988
20. Charles L. Cohen
Big steps in HEMT's, Josephson Junctions
Electronics, pp 34-35, marzo 1988
21. Ron Dagani
New class of superconductors discovered
Chemical and Engineering News, p5, febrero 1988
22. J. Karpinski, E. Kaldis
Equilibrium pressures of oxygen above YBaCuO up to 2000 bar
Nature, pp 242-245, enero 1988
23. W.I.F. David, P.P. Edwards, M.R. Harrison, R. Jones
Structural evidence for an isostructural phase transition in YBa₂Cu₃O₇ at the superconducting transition temperature
Nature, pp 245-247, enero 1988
24. Sophie L. Willkinson, Peter Savage
Superactivity in superconductivity
Chemical week, pp 8-9, febrero 1988
25. Robert Pool
Superconductors material problems
Science, pp 25-27, abril 1988
26. Superconductivity: whats the use?
Automation, p76, marzo 1988

27. Dietrick E. Thomsen
Thallium, bismuth, superconductivity
Science News, p213, abril 1988
28. Alex Kolskov
Keeping current with super conductivity
Discover, pp26-27, abril 1988
29. What do "warm" superconductors promise?
Machine Design, pp 23-24, marzo 1988
30. R. Lopez
El Motor de Gasolina está a Diez Años de Desaparecer
El Universal, 14 mayo 1987
31. Laboratories AT and T Bell
The new superconductivity (ceramic oxides)
Scientific American, pp 32-33, junio 1987
32. Juri Matisoo
El computador superconductor (Una nueva tecnología
microelectrónica sustituirá a los viejos transistores por
interruptores superconductores. Los computadores que se
fabriquen con ellos podrán efectuar hasta mil millones de
operaciones elementales por segundo)
Investigación y Ciencia, pp 18-35, julio 1980
33. Ana María Sánchez
Superconductores a temperatura ambiente
Gaceta UNAM, p19, 22 agosto 1988
34. Roth K.
Experimentation with do it-your self high-temperature
superconductors
Chemie in Unserer Zeit, pp 30-32, 1988
35. Garcia N., Flores F., Guinea F.
The superconductor gap at temperature zero
Journal of Vacuum Science and Technology, pp 323-326, 1988
36. Swinbanks D.
High-Critical Temperature Superconductor Made From Glass
Nature, p575, 1988
37. Yen Yo, Lemberger Tr.
Novel Tunneling Technique for Measuring Electron-
Scattering Rates in Superconductors Application To Sn and
Sn-in films
Physical Review B. Condensed Matter, pp 3324-3335, 1988
39. Kitada M.
Superconducting transition-temperature of ceramic
superconductors
Journal of materials science letters, p42, 1988

40. Fujinaka M., Obo N., Kikuchi H.
Resonance characteristics of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$
superconductor ceramic coil
International Journal of Electronics, pp 657-670, 1988
41. Majoros M., Mits R.G., Polak M., Rashmanau A.L.
Current carrying capacity of superconductors for 50Hz
applications
Cryogenics, pp 617-620, noviembre 1987
42. Raudseep M., Hawthorne F.C., Zhou X.Z.
Diamagnetic and structural characterization of orthorhombic
high-temperature superconductors in the system $YBaCuO$
Ceramic Journal of Physics, pp 1145-1148, 1987
43. Akhmetov A.A., Baev V.P.
Formation of resistive structure in a composite
superconductor with high contact resistance
Cryogenics, pp 631-634, noviembre 1987
44. Bretscher H., Frey T., Jenny H., Geiser V., Guntherodt H.J.
Calorimetric-properties of high-temperature superconductors
Helvetica Physica Acta, p206, 1988
45. J. Clarke, R.H. Koch
The impact of high-temperature superconductivity on SQUID
magnetometers
Science, pp 217-223, octubre 1988
46. C. Michel, B. Raveau
The critical temperature of superconductors is steadily
rising
Recherche, pp 968-970, julio-agosto 1988
47. M.A. Subramanian, C.C. Torardi, J. Gopalakrishnan, P.L. Gai
Bulk superconductivity up to 122K in the $TlPbSrCaCuO$ system
Science, pp 249-252, octubre 1988
49. W.W. Anderson
Aerospace applications of high temperature
superconductivity
Proc. SPIE, p182, 1988
50. Key Abstracts High-Temperature
INPEC (the institution of electrical engineers)
marzo, abril, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre,
noviembre 1988
enero, febrero, marzo 1989
51. Boletín Alerta de Superconductividad
Instituto de Investigaciones Eléctricas
mayo, 15 junio, 7 septiembre, 15 septiembre 1987
16 marzo, 25 abril 1988