

JUNTURAS JOSEPHSON BASADAS EN SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA

por

Pedro Prieto¹ & Wilson Lopera²

Resumen

Prieto, P. & W. Lopera: Junturas Josephson basadas en superconductores de alta temperatura. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 25(96): 381-394, 2001. ISSN 0370-3908.

La mayor parte de las aplicaciones de la superconductividad en electrónica, están basadas en el efecto *Josephson*. La fabricación de dispositivos Josephson basados en superconductores de alta temperatura (SATC) ofrece altas temperaturas de trabajo y un mayor rendimiento. Sin embargo, las complejas características de estos materiales generan una gran variedad de problemas que se deben sortear para el desarrollo de dispositivos de buena calidad basados en estos compuestos. En este artículo se describen las características principales del efecto Josephson y los diferentes sistemas desarrollados para elaborar junturas Josephson con SATC. Se hace énfasis en las junturas Josephson de frontera de grano mostrando como se logra aumentar el rendimiento de las muestras dopando el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ con plata. Finalmente se describe la elaboración y caracterización de dispositivos tipo escalón, basados en $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ que se comportan como una serie de junturas Josephson apiladas y presentan valores significativamente grandes de la figura de mérito.

Palabras claves: Efecto Josephson, Junturas, Superconductividad, Cupratos, Películas Delgadas Epitaxiales.

Abstract

The electronic applications of superconductivity are based on the *Josephson effect*. The fabrication of Josephson devices based on high temperature superconductors (HT_c) offers high work temperatures and efficiency. Nevertheless, the complex characteristics of these materials show a great variety of problems in the development of high quality devices based on these compounds. In this paper we describe the main features of the Josephson effect and the different developed systems to elaborate Josephson junctions with HT_c . We have focused in *Grain Boundary Josephson Junctions* showing how increase superconducting properties of samples doping $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ with silver. Finally we describe the elaboration and characterization process for *Step Stack Josephson Junctions* based on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ which show large values of the figure of merit.

Key words: Josephson Effect, Junctions, Superconductivity, Cuprates, Epitaxial Thin Films.

1 Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, A.A. 25360, Cali, Colombia.

2 Grupo de estado Sólido, Instituto de Física, Universidad de Antioquia, A.A. 1226, Medellín, Colombia.

1. Introducción

Desde el descubrimiento de la superconductividad al comienzo de este siglo, los científicos e ingenieros han estado en la búsqueda de aplicaciones para este fenómeno. Dos grandes campos de aplicaciones se pueden distinguir: Aplicaciones de gran escala y de pequeña escala. Las aplicaciones de gran escala están basadas en corrientes superconductoras con resistencia cero, por ejemplo en electroimanes de alto campo o cables delgados que puedan transportar grandes cantidades de corriente. Las aplicaciones de pequeña escala se basan en la fabricación de dispositivos electrónicos superconductores con altas velocidades de conmutación y bajo consumo de potencia, comparados con los dispositivos basados en materiales semiconductores. Las investigaciones en este campo fueron fuertemente incrementadas debido al descubrimiento de los superconductores de alta temperatura crítica (SATC) [Bednorz & Müller 1986], pero rápidamente se encontró que estos materiales cerámicos eran mucho más complicados de trabajar que los superconductores convencionales. Para aplicaciones en electrónica, básicamente dos ingredientes son necesarios: Primero, la posibilidad de crecer películas delgadas superconductoras, metálicas y aislantes basadas en estos materiales con muy alta calidad epitaxial sobre sustratos especiales, y el segundo ingrediente es la utilización de un método de estructuración de las películas confiable.

La unión o juntura Josephson es el elemento clave en la mayor parte de los dispositivos superconductores desarrollados para aplicaciones, y muy pronto después del descubrimiento de los SATC, se realizaron los primeros intentos de fabricación de junturas Josephson basadas en estos cerámicos superconductores usando las fronteras de grano dentro del material. Los SATC de mayor interés para los investigadores son el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) y el $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) debido a que ellos exhiben altas temperaturas de transición al estado superconductor ($T_c \approx 90 \text{ K}$) y ofrecen la posibilidad de ser depositados en forma de película delgada con alta calidad epitaxial a través de diferentes técnicas.

2. Tunelamiento Josephson

El *tunelamiento* es un fenómeno de la mecánica cuántica por medio del cual partículas (como por ejemplo los electrones) penetran barreras de energía potencial. Esto no puede suceder en un modelo de partículas clásicas como

las bolas de billar, pero cuando las partículas son representadas por funciones de onda mecánico cuánticas, es posible para la función de onda existir dentro de la barrera y es posible para la partícula ser encontrada (con probabilidad finita) al otro lado de la barrera [Merzbacher 1961]. Entonces se dice que la partícula ha realizado "tunelamiento" a través de la barrera.

En 1962 el británico Brian D. Josephson predijo teóricamente que los superconductores deberían exhibir un fenómeno similar, donde una corriente superconductora puede realizar tunelamiento a través de una barrera y continuar fluyendo en otro superconductor al otro lado de la barrera [Josephson 1962], lo cual fue confirmado experimentalmente un tiempo relativamente corto después de su predicción [Anderson & Rowell 1963]. Este fenómeno conocido actualmente como *Efecto Josephson*, se logra experimentalmente fabricando un dispositivo basado en películas delgadas, donde la barrera de potencial es suministrada por un material no-superconductor que es evaporado encima de la superficie de una película superconductora y luego otra capa superconductora es evaporada encima de esta barrera. La forma de las curvas características de corriente-voltaje de este dispositivo depende del ancho de la barrera tal como se muestra en la figura 1 [Matisoo 1980]. Si la barrera es muy gruesa a cualquier temperatura (a) no se produce ninguna corriente de tunelamiento electrónico para ningún voltaje. Cuando la barrera es más delgada y el dispositivo se encuentra a una temperatura mayor que la temperatura crítica, T_c , del superconductor (b), entonces aparece una corriente de tunelamiento, y el dispositivo se comporta como un conductor normal, con la corriente variando en proporción directa con el voltaje. Cuando la temperatura del dispositivo comienza a disminuir por debajo de T_c , los electrodos pasan al estado superconductor y los electrones de éstos se organizan en pares, de acuerdo con la teoría BCS [Bardeen, Cooper & Schrieffer 1957] de la superconductividad, los cuales son denominados *pares de Cooper*. Entonces la relación de la corriente de tunelamiento con el voltaje de la unión deja de ser cada vez menos lineal a medida que disminuye la temperatura (c). Para temperaturas muy por debajo de T_c se observa que la corriente de tunelamiento sólo aparece cuando el voltaje en la unión supera un cierto valor. Este valor está directamente relacionado con la brecha de energía Δ , la cual es la energía necesaria que se debe suministrar al superconductor para romper el par de Cooper. Una vez roto el par, los electrones no apareados logran cruzar la barrera por tunelamiento electrónico ordinario, conocido

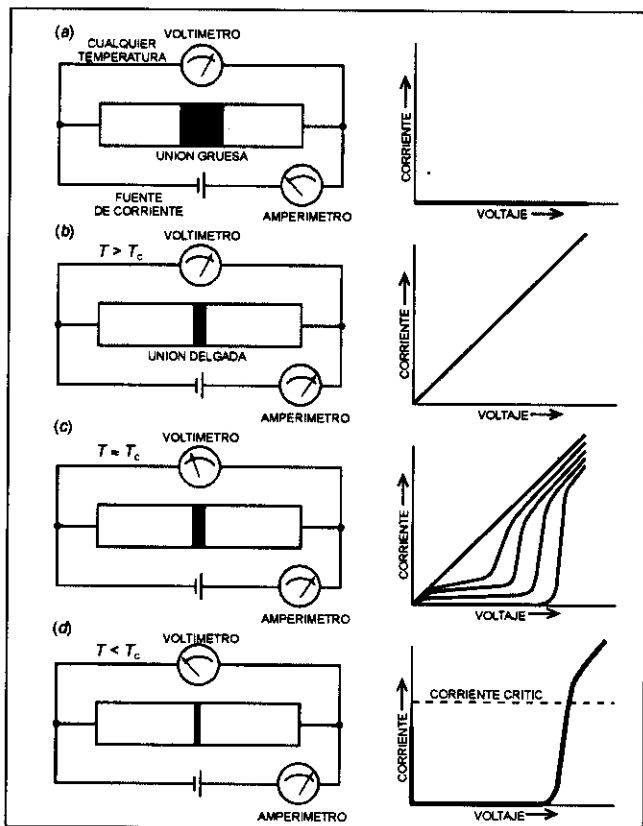


Figura 1. Curvas características I - V en diferentes configuraciones de temperatura y ancho de barrera para una juntura superconductor-aislante-superconductor (SIS) [Matisoo 1980].

en este caso como tunelamiento de cuasipartícula. Finalmente, por debajo de T_c , y cuando la barrera es suficientemente delgada ocurre el efecto Josephson (d), en el cual los pares de Cooper logran penetrar la barrera sin romper el par produciéndose entonces una corriente de tunelamiento de pares, la cual es superconductora. Esto significa que esta corriente circula con resistencia cero y por consiguiente no produce ningún voltaje en la unión. La corriente permanece superconductora siempre y cuando no exceda un valor crítico conocido como corriente crítica I_c , por encima de la cual el voltaje salta a un valor diferente de cero y la unión se comporta como una barrera de tunelamiento resistiva. Una unión que presente un comportamiento similar al de la figura 1d se le denomina *Juntura Josephson*, JJ.

Una condición para obtener el efecto Josephson, es que el ancho de la barrera de la juntura sea del orden de la longitud de coherencia, ξ , del superconductor, la cual determina la distancia promedio a la que se encuentran los

dos electrones que forman el par de Cooper. Dependiendo de las propiedades del material de la barrera (aislante o metal normal) se reconocen dos tipos de junturas: superconductor - aislante - superconductor (SIS) y superconductor - normal - superconductor (SNS).

Las dos ecuaciones básicas que describen el efecto Josephson están dadas por:

$$I = I_c \sin \varphi \quad (1)$$

y

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2eV}{\hbar} \quad (2)$$

donde I es la corriente que circula a través de la juntura, I_c es la corriente crítica, V es el voltaje que aparece en la unión, e es la carga del electrón, $\hbar$ es la constante de planck (h) dividida por 2π , y finalmente φ es la diferencia de fase ($\theta_2 - \theta_1$) de la función de onda, $\psi(r, \theta)$, que describe, según la mecánica cuántica, el estado superconductor en ambos lados de la barrera

La ecuación (1) describe que una corriente finita puede fluir a través de la barrera sin que aparezca un voltaje en la unión, a lo que se conoce como el *Efecto Josephson d.c.* Por otra lado, cuando un voltaje d.c. es aplicado, la integración de la ecuación (2) muestra que el argumento de la función seno en (1) se convierte en $\varphi = \varphi_0 + (2e/\hbar)Vt$ y por lo tanto se genera una supercorriente oscilante:

$$I = I_c \sin \left(\varphi_0 + \frac{2e}{\hbar} Vt \right) \quad (3)$$

con una frecuencia de Josephson ν_J , dada por: $\nu_J = (2e/h)V$. Estas oscilaciones producen emisión de radiación electromagnética con la misma frecuencia. El comportamiento descrito por (2) y (3) es conocido como *Efecto Josephson a.c.* y fue observado por primera vez en 1963 [Shapiro 1963]. Posteriores experimentos confirmaron que un voltaje d.c. de $1 \mu V$ a través de una juntura Josephson produce una corriente oscilante con una frecuencia de 483.6 MHz como predice la ecuación (3) [Finnegan et al. 1971].

Una curva característica típica de corriente-voltaje para una juntura Josephson tipo SIS es mostrada en la figura 2. Se puede observar que la curva tiene un comportamiento claramente histerético.

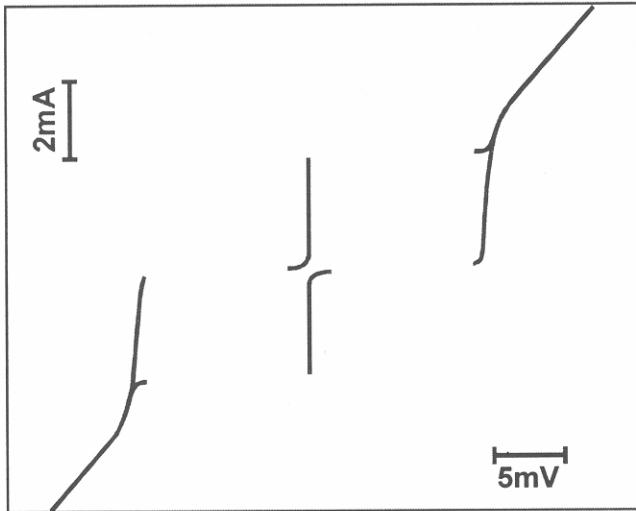


Figura 2. Curva característica típica de corriente-voltaje para una juntura Josephson tipo SIS de $\text{Sn-Sn}_x\text{O}_y\text{-Sn}$ a $T = 1.52 \text{ K}$ [Barone & Paternò 1982].

3. Modelo RCSJ

El efecto Josephson no solamente se obtiene en junturas planares tipo SIS o SNS como las que hemos mencionado, sino que se puede presentar en cualquier tipo de configuración en la que dos superconductores se encuentren acoplados débilmente. Un ejemplo de esto es la juntura tipo constricción que aparece en la figura 3, en la que dos electrodos superconductores se encuentran conectados a través de un micropuente del mismo material. Al circular una corriente lo suficientemente grande, afectará las propiedades superconductoras del micropuente sin perturbar los electrodos, entonces se dice que existe un enlace débil (weak link) entre los electrodos superconductores.

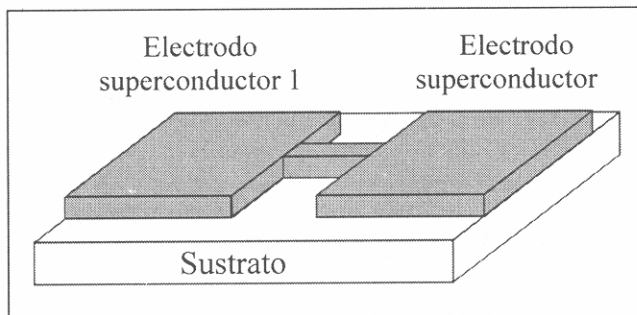


Figura 3. Película delgada superconductora con una constricción. Esta presenta un comportamiento de juntura de enlace débil (weak link).

Una de las medidas más importantes de una juntura es su curva característica de corriente-voltaje (curva $I-V$) ya que la forma de la curva depende del tipo de juntura que se esté estudiando. Las junturas SIS tienen un comportamiento marcadamente histerético como se observa en la figura 2, mientras que las junturas SNS o las de enlace débil son generalmente monovaluadas, al menos para temperaturas no muy lejos de T_c , tal como se muestra en la figura 4.

Las ecuaciones (1) y (2) se aplican para el caso ideal en el cual toda la corriente es suministrada por pares de Cooper. En el caso más general pueden haber otros tipos de corriente fluyendo. Las diferencias en las curvas $I-V$ de las distintas junturas de enlace débil no son completamente inherentes a la naturaleza física diferente de estas estructuras, y muchas de las características de las curvas $I-V$ en los “weak links” pueden ser modelados en términos de un circuito simple en el cual la capacitancia distribuida y la conductancia de cuasipartícula del dispositivo son consideradas como elementos en paralelo con una juntura Josephson ideal [McCumber 1968]. Este modelo conocido como “Resistively and Capacitively Shunted Junction Model” (modelo RCSJ) supone que una juntura Josephson real está siempre intrínsecamente conectada por una resistencia R_n , y una capacitancia C , tal como se observa en la figura 5. Introduciendo estos dos términos a la ecuación (1) se obtiene:

$$I = I_c \sin \varphi + \frac{V}{R_n} + C \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

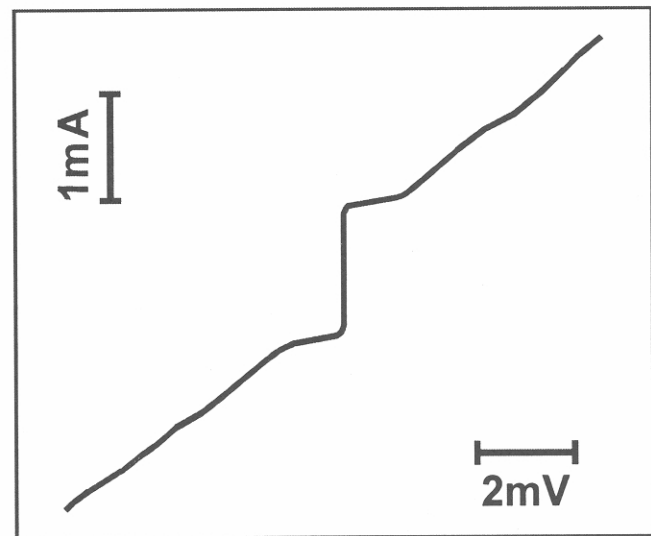


Figura 4. Curva característica $I-V$ de una juntura tipo enlace débil (weak link) elaborada con un puente de aluminio [Barone & Paternò 1982].

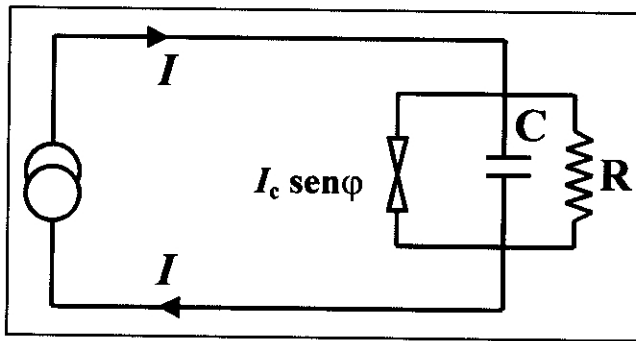


Figura 5. Circuito equivalente de una juntura Josephson real, según el modelo RCSJ, en el cual, un elemento Josephson ideal se encuentra en paralelo con una capacitancia y una resistencia. El circuito es alimentado por una fuente de corriente d.c. mostrada a la izquierda.

Para el caso particular en que los efectos capacitivos son despreciables ($C \approx 0$) la ecuación (4) se puede solucionar exactamente obteniéndose el denominado *modelo RSJ*:

$$V = \pm I_c R_n \sqrt{\left(\frac{I}{I_c}\right)^2 - 1} \quad \text{para } |I| > I_c \quad (5a)$$

$$V = 0 \quad \text{para } |I| < I_c \quad (5b)$$

$$V = IR_n \quad \text{para } |I| \gg I_c \quad (5c)$$

El comportamiento gráfico de esta ecuación se observa en la figura 6. Cuando la corriente que circula la juntura tiene un valor menor a I_c , no existe voltaje en la unión. Para corrientes mayores a I_c , aparece un voltaje determinado por la ecuación (5a), el cual tiende a la expresión IR_n , para valores muy grandes de corriente. Entonces podemos observar que R_n es el valor de la resistencia de la juntura en el estado normal.

4. Dependencia con la radiación de Microondas y el campo magnético

Una de las evidencias experimentales de la presencia del efecto Josephson en una juntura, es observar el comportamiento de las curvas I - V cuando la muestra es irradiada con microondas. Con la radiación se crea una interacción entre la corriente Josephson a.c. y la señal de microonda externa, lo cual produce la aparición de unos saltos de corriente espaciados por un valor de voltaje constante, y que forma una especie de escalones en las curvas I - V denominados *escalones de Shapiro* o "*Shapiro steps*" [Shapiro et al. 1964]. En la figura 7 se puede

observar como se modifica la forma de la curva I - V de una juntura Josephson cuando es irradiada con microondas de 35 GHz de frecuencia, con la aparición de los escalones de Shapiro.

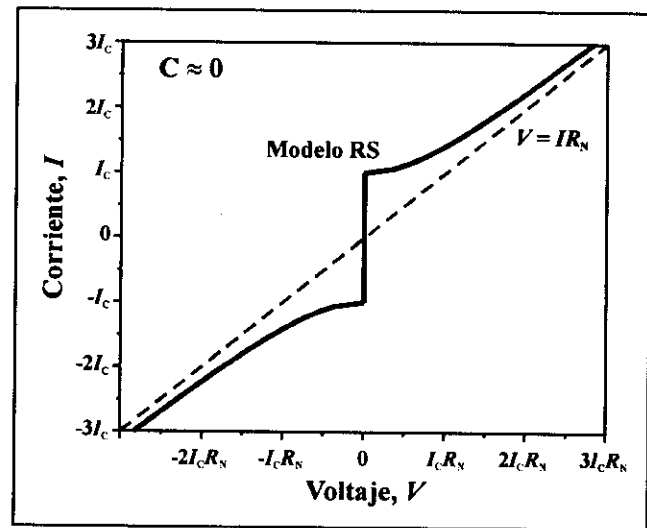


Figura 6. Curva característica de corriente-voltaje para el circuito Josephson de la figura 5 cuando $C \approx 0$ (Modelo RSJ). La línea punteada representa la curva correspondiente al comportamiento lineal: $V = IR_n$, donde R_n constituye la resistencia de la juntura en el estado normal.

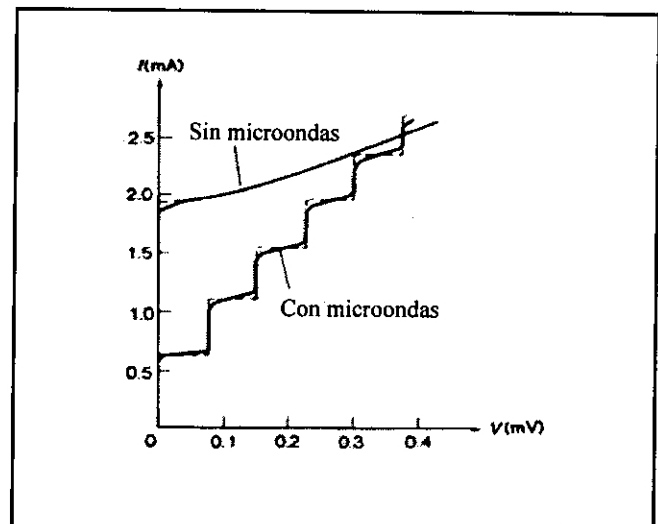


Figura 7. Aparición de los escalones de Shapiro en la curva característica de corriente-voltaje de una juntura Josephson tipo punto de contacto por la presencia de radiación de microondas de 35 GHz de frecuencia

Los escalones de Shapiro ocurren a valores discretos de voltaje V_n , dados por:

$$V_n = \frac{nh}{2e} f \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (6)$$

donde f es la frecuencia de la radiación de microonda aplicada. Para una juntura SIS es fácil de entender como aparece esta contribución a la corriente d.c. Cuando el voltaje d.c. a través de la juntura es igual a V_n , hay una diferencia de energía de $2eV_n$ entre los pares de Cooper a cada lado de la barrera. Cuando la radiación externa está presente, los procesos de tunelamiento de pares sólo son posibles cuando un par absorbe o radia n fotones de frecuencia f . La máxima probabilidad para este proceso se obtiene cuando la relación (6) se cumple. Una frecuencia de radiación típica de 10 GHz produce escalones separados por 20 μ V.

Otra característica que permite evaluar la presencia del efecto Josephson en una juntura es la dependencia de la corriente crítica con el campo magnético, $I_c(B)$. Cuando un campo magnético B , es aplicado sobre una juntura Josephson, la corriente crítica de la juntura modula con la variación de campo magnético a través de la siguiente expresión:

$$I_c(B) = I_c(0) \left| \frac{\sin \pi (\Phi_B / \Phi_0)}{\pi (\Phi_B / \Phi_0)} \right| \quad (7)$$

donde $I_c(0)$ es la corriente crítica sin presencia de campo, Φ_B es el flujo de campo magnético que atraviesa la juntura, y Φ_0 es una constante fundamental denominada *cuanto de flujo magnético*, $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb.

La ecuación (7) es idéntica al patrón de difracción que forman las ondas de luz cuando pasan a través de una pequeña rendija, y que se denomina *patrón de Fraunhofer*. Un patrón de Fraunhofer típico obtenido experimentalmente se puede observar en la figura 8 [Balsamo et al. 1976].

5. Junturas Josephson en SATC

Con el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura crítica (SATC) empezó un gran interés en la realización de junturas Josephson basados en estos nuevos óxido, para su aplicación en la crioelectrónica. Tener valores más altos de T_c da la posibilidad de obtener

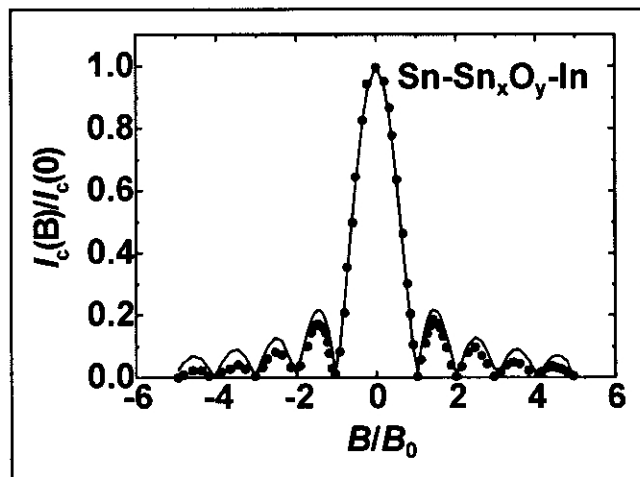


Figura 8. Patrón de Fraunhofer que experimenta la corriente crítica en función del campo magnético de una juntura de Sn-Sn_xO_y-In. Los círculos son los datos experimentales y la línea sólida es la curva teórica según la ecuación 7 [Balsamo et al. 1976].

temperaturas de trabajo más altas en los dispositivos realizados con estos materiales pudiéndolos refrigerar con nitrógeno líquido (alrededor de 77 K) en lugar de helio (4.2 K). Además con estas altas temperaturas era posible pensar en la realización de circuitos híbridos conteniendo dispositivos superconductores y semiconductores. Los altos valores de T_c están también conectados con una brecha de energía, Δ , más grande y un voltaje característico de las junturas Josephson, $V_c = I_c R_n$, más alto. Este voltaje característico es de suma importancia ya que se constituye en la figura de mérito de una juntura Josephson, debido a que es independiente de la geometría y las dimensiones de éstas, y además a que está directamente relacionado con las velocidades de conmutación de los dispositivos y las resoluciones de campo magnético de los SQUIDS (Superconducting Quantum Interference Devices) fabricados con las junturas. Estos SQUIDS se basan en una espira superconductora conectada por una o dos junturas Josephson en paralelo, y son los detectores de campo magnético más sensibles que existen [Clarke 1994], con muchas aplicaciones, entre las cuales se destacan la magnetoencefalografía y la magnetocardiografía, utilizadas para el diagnóstico de tumores cerebrales y enfermedades del corazón respectivamente. Así entonces, el aumento de T_c debe conducir a frecuencias características más altas, mayores velocidades de conmutación y mejor resolución de flujo de campo magnético en los SQUIDS desarrollados con estos materiales. Por otro lado los SATC presentan una fuerte anisotropía con respecto a la orientación cristalográfica y muy pequeñas longitudes de coherencia,

por debajo de 1 nm. Esto hace que los conceptos tradicionales para dispositivos Josephson tales como las junturas planares SIS estándar de la crioelectrónica de baja temperatura sean difíciles de realizar con SATC, ya que esto significa el crecimiento de multicapas basadas en películas delgadas de alta calidad epitaxial y barreras aislantes con un espesor menor a 10 Å. Otros problemas aparecen por la dinámica de vórtices en estos superconductores tipo II extremos.

Para sortear las dificultades estructurales de los SATC, los cuales tienen una estructura en forma de capas, una gran variedad de diferentes geometrías de junta fueron desarrolladas de tal forma que el acoplamiento tome lugar a lo largo del plano a - b donde la longitud de coherencia es mayor. En la figura 9 se muestran los principales tipos de junturas desarrolladas. Un número de variaciones a los conceptos presentados han sido usados, pero ellos pueden ser resumidos bajo unos pocos principios.

Las primeras junturas con SATC se realizaron sobre las fronteras de grano presentes en forma natural dentro de las películas. Pequeños micropuentes estructurados sobre la película son atravesados con una cierta probabilidad por una de estas fronteras de grano, exhibiendo un comportamiento de enlace débil (a). Sin embargo este tipo de junturas dejaron de implementarse rápidamente debido a la amplia dispersión de sus propiedades. Un paso adelante a una junta más controlada se logró usando fronteras de grano definidas artificialmente, las cuales pueden ser creadas utilizando sustratos bicristalinos (b) o usando una capa intermedia (c) para producir diferentes orientaciones de crecimiento en las películas crecidas sobre éstos, ubicando una frontera de grano en el centro de la película. Un escalón fabricado artificialmente sobre el sustrato crea una serie de dos fronteras de grano sobre las películas (d). Las propiedades de estas junturas dependen de la calidad cristalina en la frontera de grano así como del ángulo entre los granos de los electrodos. Su ventaja es el rápido procedimiento de preparación.

El comportamiento de enlace débil es también implementado modificando artificialmente las propiedades del superconductor en un micropunto, por ejemplo haciéndole incidir un haz de iones o de electrones (e).

Las junturas tipo SXS usan un material de barrera entre los electrodos superconductores para desarrollar un comportamiento de tunelamiento o de enlace débil. El material de barrera puede ser un aislante (SIS),

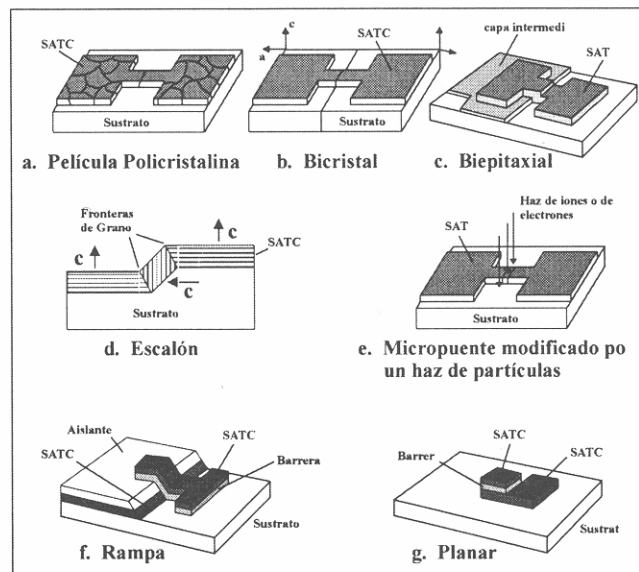


Figura 9. Diferentes tipos de fabricación de junturas Josephson con superconductores de alta temperatura crítica.

semiconductor (SSeS) o un conductor normal (SNS). Incluso superconductores con una T_c reducida con respecto a los electrodos son usados (SS'S). Una de las junturas tipo SNS o SIS más estudiadas es la junta tipo rampa (f). Después de la deposición de las primeras dos capas de superconductor y aislante, un proceso de erosión (etching) fabrica un escalón en forma de rampa sobre la bicapa. Finalmente son depositados la barrera y el segundo electrodo superconductor [Faley & Poppe *et al.* 1994]. Usando este tipo de junturas una amplia variedad de materiales de barrera han sido estudiados. Este tipo de junturas al lado de las bicristalinas son las más desarrolladas y en muchos casos el punto de inicio para el desarrollo de dispositivos con aplicaciones en la electrónica superconductora.

Las junturas tipo planar, también conocidas como tipo "sandwich" o tricapa, involucran el concepto de una configuración de apilamiento (g). Este tipo de junturas es el más usado con superconductores convencionales de baja temperatura y la ventaja de éstas consiste en que la multicapa puede ser crecida *in situ*, es decir, sin necesidad de romper el vacío durante el proceso. Esto evita cualquier contaminación en las interfaces entre los electrodos superconductores y la barrera.

Como se mencionó anteriormente, el valor del voltaje característico $V_c = I_c R_n$ o producto $I_c R_n$ de una junta

Josephson, es un parámetro muy importante relacionado con la brecha de energía, tiempos de conmutación y resolución de flujo de campo magnético en los SQUIDS, y es usado para comparar los diferentes tipos de juntura. En la tabla 1 se lista los productos $I_c R_n$ y temperaturas críticas de diferentes tipos de junturas Josephson de alta temperatura.

6. Junturas Josephson en bicristales

Una de las técnicas más utilizadas para fabricar junturas Josephson de frontera de grano (Grain Boundary Junctions, GBJ) consiste en el crecimiento epitaxial de películas superconductoras de alta temperatura crítica sobre un sustrato bicristalino. Un bicristal consiste de dos piezas fundidas de un monocristal, como el SrTiO_3 , con un ángulo de desorientación relativa entre los ejes cristalográficos. Las películas de SATC elaboradas sobre este tipo de sustratos, crecen con el eje c perpendicular a la superficie del sustrato pero con el mismo ángulo de desorientación del plano $a-b$ a lado y lado de la frontera de grano creada por el bicristal. En la figura 10 se muestra la curva característica $I-V$ de una juntura bicristalina de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-\delta}$ de 10 μm de ancho y con un ángulo de desorientación de 24° [Lopera *et al.* 2000]. La curva tiene un típico comportamiento de acuerdo con el modelo RSJ con un valor del producto $I_c R_n$ alrededor de 2 mV a una temperatura de 4.2 K. Al hacer incidir una señal de

microondas con una frecuencia de 8.26 GHz aparecen los escalones de Shapiro en valores fijos de voltaje. La separación entre los escalones es de 17 μV , lo cual está de acuerdo con el valor predicho por la teoría de Josephson: $h/2e$, según la ecuación (6).

Como se mencionó anteriormente una de las aplicaciones de las junturas Josephson consiste en la elaboración de SQUIDS. Un SQUID d. c. contiene un par de junturas Josephson en paralelo dentro de un circuito (loop) de corriente superconductor. Este tipo de disposición de las junturas se ha logrado diseñar con películas epitaxiales de SATC crecidas y fotolitografiadas sobre sustratos bicristalinos de SrTiO_3 [Vivas *et al.* 2000]. En la figura 11 se muestra las curvas características $I-V$ para un circuito superconductor depositado sobre un sustrato bicristalino de SrTiO_3 con un ángulo de 24° de desorientación a temperaturas entre 20 y 50 K. Las curvas presentan un claro comportamiento RSJ como se puede observar en el inserto superior de la figura. En el inserto inferior se muestra la geometría del diseño realizado sobre la película para obtener la configuración de dos GBJs en paralelo dentro de un "loop" superconductor. El efecto de una irradiación con microondas de 6.94 GHz de frecuencia en este dispositivo se presenta en la figura 12. Claramente se observa la presencia de los escalones de Shapiro indicando que el efecto Josephson a.c. se encuentra presente en las junturas que componen el "loop"

Tipo de juntura	material	T = 4.2 K	$I_c R_n$ T = 77K	T_c [K]
Película policristalina	YBCO	30 μV - 3 mV	1 - 200 μV	79
Juntura Bicristalina	YBCO	0.2 - 8 mV	0.1 - 0.2 mV	90
Juntura Biepitaxial	YBCO	0.1 - 1 mV	1 - 10 μV	80
Juntura tipo escalón	YBCO	0.3 - 5 mV	30 - 500 μV	82
	TBCCO		5 mV	
Juntura tipo rampa con barrera	YBCO	1 - 8 mV	160 μV	80
Juntura tipo planar con barrera	YBCO	170 μV		28
	BSCCO	500 μV		30
Puente S-N-S con escalón (Ag, Au)	YBCO	0.2 - 2 mV	10 - 150 μV	85
Puente S-N-S (Ag)	YBCO	1 mV	200 μV (46 K)	75
Puente modificado por haz	YBCO	1 mV	40 μV (66.2K)	82

Tabla 1. Valores del producto $I_c R_n$ y de la temperatura crítica, T_c , obtenidos experimentalmente para diferentes tipos de junturas Josephson de alta

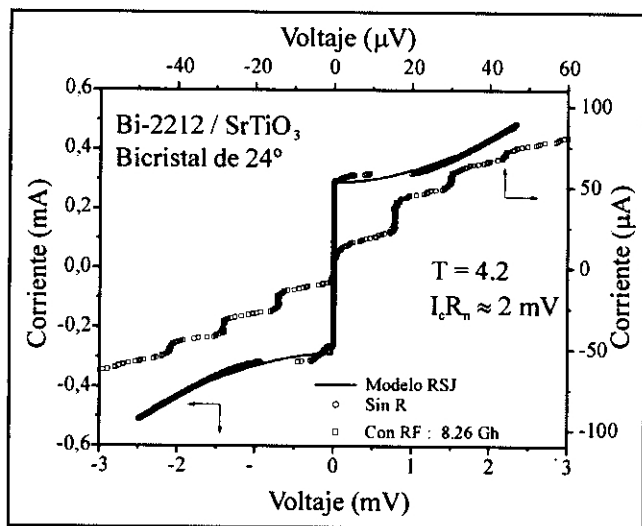


Figura 10. Curva I - V de una juntura tipo Bicristal de Bi-2212 a 4.2 K. Los círculos corresponden a los datos experimentales sin irradiación de microonda. La línea sólida representa el ajuste teórico con el modelo RSJ. Finalmente, los cuadrados corresponden a las medidas de la curva I - V bajo irradiación de microonda de 8.26 GHz de frecuencia [Lopera *et al.* 2000].

superconductor.

Las características de las GBJs puede ser perfeccionado usando películas delgadas epitaxiales con valores de la corriente crítica por encima de 10^6 A/cm² a 77 K. Esto se ha logrado mejorar en películas delgadas de YBCO dopadas con plata [Bolaños *et al.* 1997], las cuales muestran una mejor microestructura con el incremento

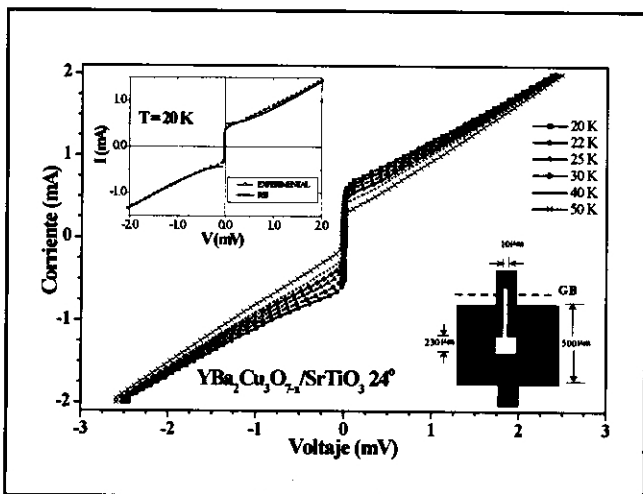


Figura 11. Curvas I - V de un "loop" superconductor con dos junturas Josephson tipo bicristal en paralelo a diferentes temperaturas [Vivas *et al.* 2000].

del tamaño de grano, una mayor orientación del grano y fases sin impurezas en la frontera de grano. La figura 13 muestra como varía la densidad de corriente crítica J_c , a medida que aumenta el dopaje con plata desde 0 % hasta 15 %. Se observa como J_c obtiene un valor máximo para un nivel de dopaje con plata del 5 % [Bolaños *et al.* 2000]. El producto $I_c R_n$ obtenido para este valor óptimo de dopaje mejora en un 58 % aproximadamente con respecto a una muestra sin dopar tal como se observa en la figura 14.

En la figura 15 se observa que tanto las GBJs dopadas con plata como las muestras sin dopar presentan una modulación de la corriente crítica con el campo magnético siguiendo un claro patrón de Fraunhofer. Esto indica que la homogeneidad de J_c a lo largo de la frontera de grano es buena a una escala de micras. Además la simetría del patrón alrededor del campo cero, $B = 0$, indica que no hay anclaje de flujo magnético en la vecindad de la frontera de grano.

7. Efecto Josephson intrínseco

En 1992 se descubrió que el $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) se comporta como una serie de junturas Josephson tipo SIS o SNS apiladas una sobre otra [Kleiner *et al.* 1992]. A este fenómeno que posteriormente se descubrió en otros SATC altamente anisotrópicos se le denominó *Efecto Josephson Intrínseco*. Para entender este fenómeno recordemos que en los SATC se puede asumir que los pares de Cooper están concentrados en los planos de

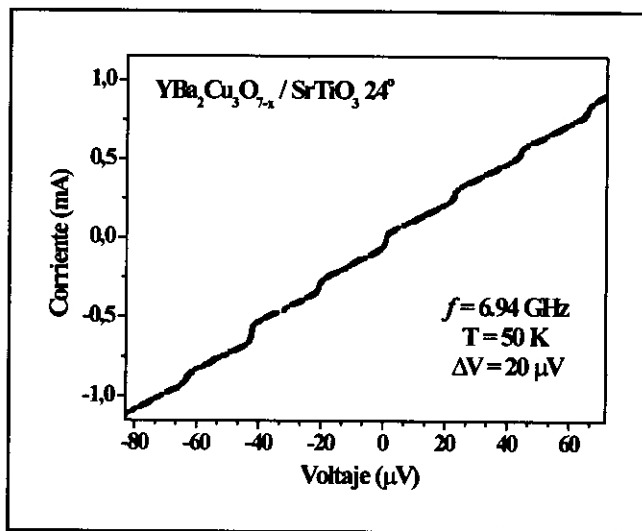


Figura 12. Curva característica de corriente-voltaje (I - V) del "loop" de la figura 11 bajo irradiación con microondas de 6.94 GHz de frecuencia a una temperatura de 50 K [Vivas *et al.* 2000].

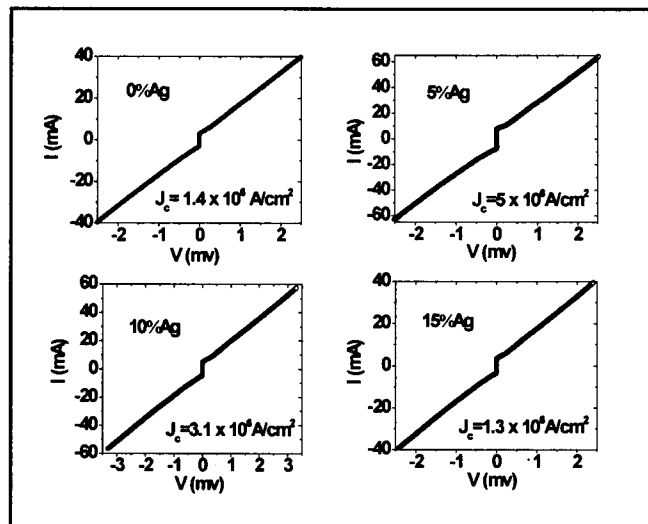


Figura 13. Determinación de la densidad de corriente crítica, J_c , para juntas bicristalinas de YBCO dopadas con diferentes porcentajes de plata (Ag). Se observa que J_c es máximo para un nivel de dopaje del 5 %.

CuO_2 . En los materiales más anisotrópicos como el Bi-2212 , el cual contiene capas dobles de CuO_2 separadas por capas de Bi_2O_3 y SrO , las densidades de corriente crítica a lo largo de los planos de CuO_2 (la dirección a - b) son al menos dos órdenes de magnitud mayores que aquellos perpendiculares a las capas (la dirección c). La relación de anisotropía de las profundidades de penetración del campo magnético, $\gamma = \lambda_{ab}/\lambda_c$, puede ser mayor a 1000. La longitud de coherencia a lo largo del eje c , ξ_c , es menor que 1 Å, es

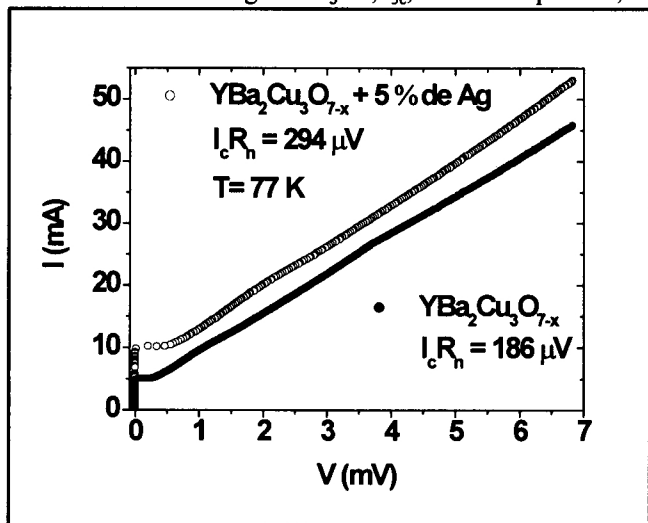


Figura 14. Determinación del producto $I_c R_n$ de una junta bicristalina de YBCO no dopada, y dopada al 5 % en peso con plata a 77 K. Se observa un aumento de la figura de mérito del 58 % en la muestra dopada con respecto a la no dopada [Bolaños *et al.* 2000].

decir, más de 10 veces menor que la distancia entre dos capas dobles de CuO_2 adyacentes. Por lo tanto se puede asumir que las capas dobles de CuO_2 actúan como electrodos superconductores de 3 Å de espesor separados por capas aislantes, semiconductoras o metálicas normales (dependiendo de la distribución del oxígeno en las capas de Bi_2O_3 y SrO) que actúan como barreras de 12 Å de espesor. Entonces desde ese punto de vista, una película delgada de 300 nm de espesor está compuesta de una serie de 200 juntas SIS o SNS acopladas por el efecto Josephson.

El estudio del efecto Josephson intrínseco en películas delgadas ofrece la posibilidad de fabricar dispositivos que utilicen este efecto y sean incluidos dentro de la tecnología de los circuitos integrados. El interés en este tipo

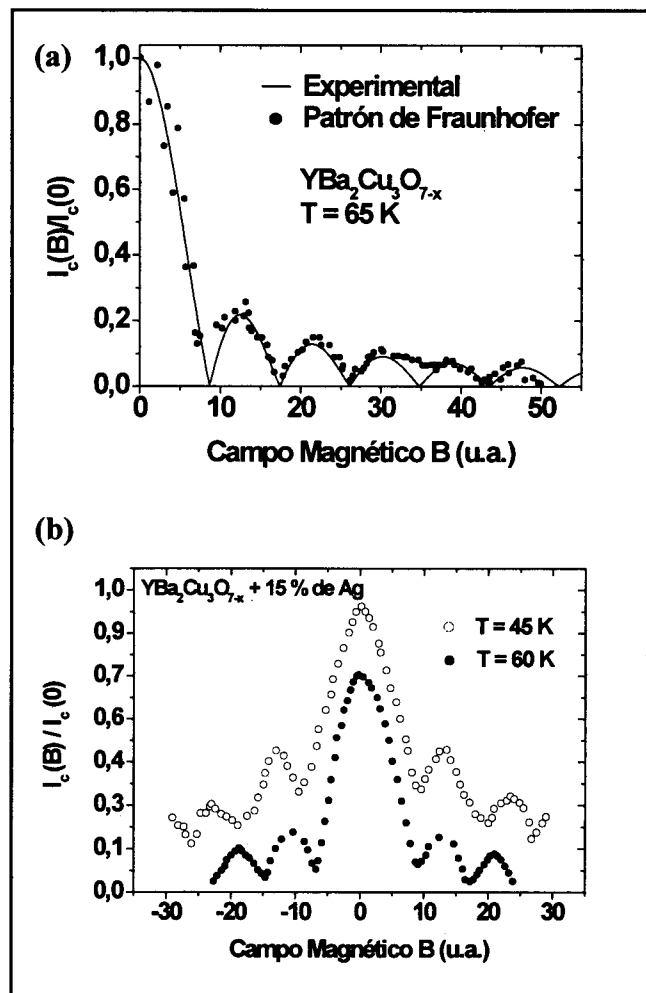


Figura 15. Dependencia de la corriente crítica con el campo magnético para una junta bicristalina de (a) YBCO y (b) YBCO dopado al 5 % en peso con plata. Se observa una modulación de la corriente crítica con el campo magnético, formando un patrón de Fraunhofer [Bolaños *et al.*].

de sistemas de Josephson interno se ha incrementado recientemente debido a que ellos pueden ser aplicados para dispositivos de alta frecuencia tales como, mezcladores (mixers) [Walkenhorst *et al.* 1997], amplificadores [Preis *et al.* 1997] y fuentes de radiación [Schlenga *et al.* 1995]. Para la fabricación de este tipo de dispositivos es necesario construir una configuración que garantice que la corriente fluya a través de los planos de CuO_2 , es decir a lo largo del eje c , dentro de la película delgada SATC.

El método de preparación de un dispositivo Josephson intrínseco conocido como Step Stack Josephson Junction (SSJJ), es mostrado en la Figura 16 [Lopera *et al.* 1999]. Inicialmente se deposita una película delgada epitaxial de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{YCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-22Y2) el cual es un material aislante pero con la misma estructura cristalina del Bi-2212 (a). Las líneas horizontales representan los planos de CuO_2 que crecen paralelos al sustrato. Luego con un proceso de fotolitografía de luz ultravioleta combinado de un ataque químico con una solución no acuosa de Bromo-Etanol, se estructura un escalón sobre la película de Bi-22Y2 (b). Después de la fotolitografía se deposita la película de Bi-2212 sobre el escalón (c). Finalmente con un nuevo proceso de fotolitografía se estructuran micropuentes entre 10 y 50 μm de ancho atravesando el escalón (d). Al poner a circular una corriente sobre este dispositivo se observa que ésta circulará a través de los planos de CuO_2 del Bi-2212 en el micropuente (Figs. 16c y d) acoplando de esta manera la serie de junturas intrínsecas con el efecto Josephson.

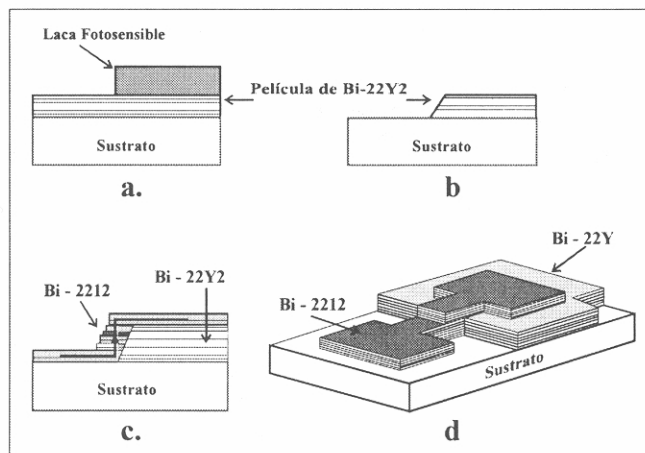


Figura 16. Proceso de fabricación de un dispositivo de efecto Josephson intrínseco denominado "Step Stack": a. Fotolitografía de ultravioleta sobre la película de Bi-22Y2; b. Erosión química hasta el sustrato; c. Deposición de la película de Bi-2212; d. estructuración de micropuentes

En la figura 17 Se observa la dependencia de la resistividad ρ con la temperatura para un SSJJ. A medida que decrece la temperatura y la muestra se acerca a su temperatura crítica, la resistividad experimenta un ligero crecimiento antes de caer abruptamente a cero. Este comportamiento de la resistividad es típico de los SATC cuando la corriente circula a través de los planos de CuO_2 . A temperaturas mayores a T_c , ρ tiene una dependencia con la temperatura de la forma $\rho_0 T^\alpha \exp(\epsilon/k_B T)$ propuesta para la conducción eléctrica a lo largo del eje c en los SATC. [Crommie & Zettl 1991], donde k_B es la constante de Boltzmann y ϵ es una energía de activación.

La forma de las curvas características de corriente voltaje dependen del comportamiento ya sea aislante o metálico normal de las capas de Bi_2O_3 y SrO que actúan como barrera en las junturas intrínsecas del Bi-2212. La figura 18 muestra una curva corriente voltaje (I - V) para una SSJJ con barreras aislantes. Una gran histéresis es claramente observada típica de las junturas tipo SIS. Otra característica de las junturas tipo SIS en las SSJJs es la dependencia de la corriente crítica con la temperatura siguiendo una relación de Ambegaokar-Baratoff [Ambegaokar & Baratoff 1963], tal como se muestra en la figura 19.

La figura 20 muestra la curva I - V para un SSJJ con barreras metálicas normales y una altura de escalón de 120 nm, a una temperatura de 4.2 K. En este caso la

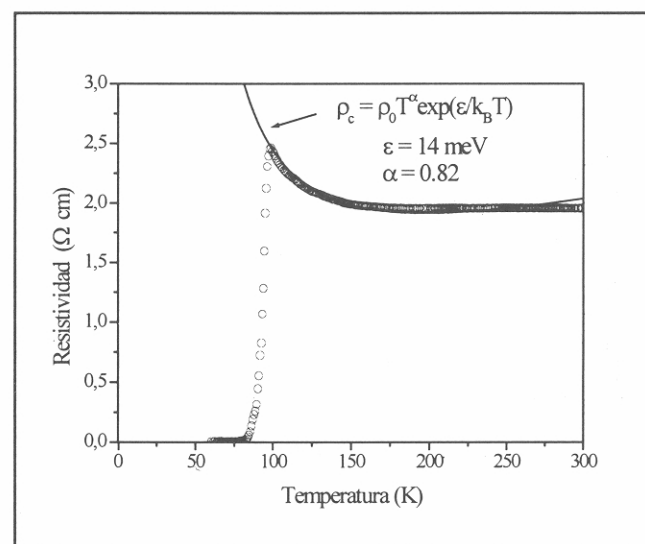


Figura 17. Resistividad como función de la temperatura de un SSJJ basado en una bicapa de Bi-2212 / Bi-22Y2. Para $T > T_c$ la curva ajusta bien con la expresión $\rho_0 T^\alpha \exp(\epsilon/k_B T)$ propuesta por Crommie & Zettl.

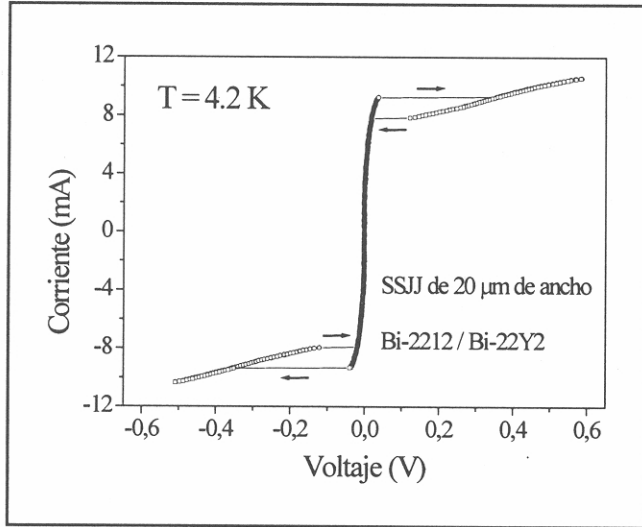


Figura 18. Curva I - V de una SSJJ de Bi-2212 / Bi-22Y2 de 20 μm de ancho a 4.2 K. Se observa un comportamiento claramente histerético similar al de las juntas Josephson tipo SIS [Lopera *et al.* 1999].

curva no presenta histéresis y muestra un claro comportamiento RSJ, característico de las juntas tipo SNS, con un valor extremadamente alto del producto $I_c R_n$ de 780 mV, el cual se explica por la presencia de unas 80 juntas Josephson en serie. Este es un claro ejemplo de la importancia de obtener estas juntas tipo escalón, ya que constituyen una forma efectiva de aumentar fuertemente el valor de la figura de mérito de los dispositivos Josephson.

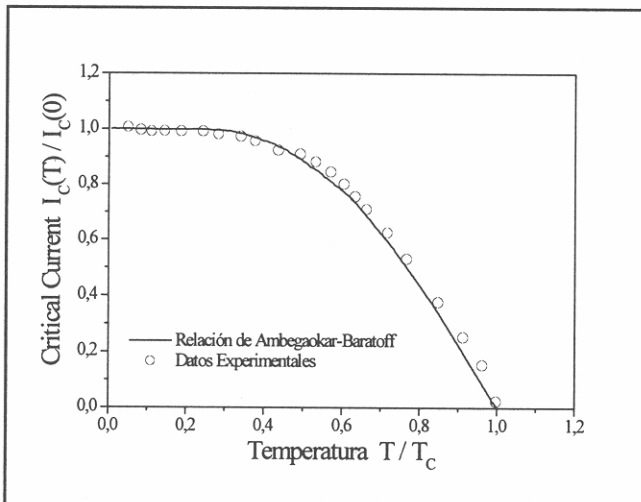


Figura 19. Dependencia de la corriente crítica con la temperatura medida sobre una SSJJ de Bi-2212 / Bi-22Y2. Los círculos indican los resultados experimentales, y la línea sólida es el cálculo teórico de Ambegaokar - Baratoff para juntas tipo SIS [Lopera *et al.* 1999].

La corriente crítica de una junta intrínseca modula con un campo magnético externo aplicado en una orientación paralela a los planos de Cu-O sobre la muestra de forma similar a como lo hace una sola junta SIS. Este tipo de modulación es apreciado en la figura 21 donde se observa la corriente crítica en función del campo magnético para un SSJJ con un ancho de 50 μm a una temperatura de 20 K. La figura no muestra un patrón de Fraunhofer bien definido debido a que las dimensiones de la junta no son suficientemente pequeñas comparadas con la longitud de penetración de Josephson λ_J , que para el caso del Bi-2212 tiene un valor de 1 μm a una temperatura de 4.2 K. Los mínimos de la modulación aparecen cuando $B = nB_0$, siendo n entero y $B_0 = \Phi_0 / bs$, donde s es la periodicidad interplanar (15 Å para el Bi-2212) y b es el ancho de la junta (50 μm). Este resultado indica que el flujo de campo magnético penetra discretamente dentro de las capas aislantes de cada junta intrínseca.

8. Conclusiones

El desarrollo de dispositivos electrónicos basados en superconductores de alta temperatura crítica promete un aumento significativo en la eficiencia de éstos, comparados con sus equivalentes basados en superconductores convencionales. A pesar de las dificultades que involucra trabajar con los SATC debido a su fuerte anisotropía y extremadamente corta longitud de coherencia entre otras,

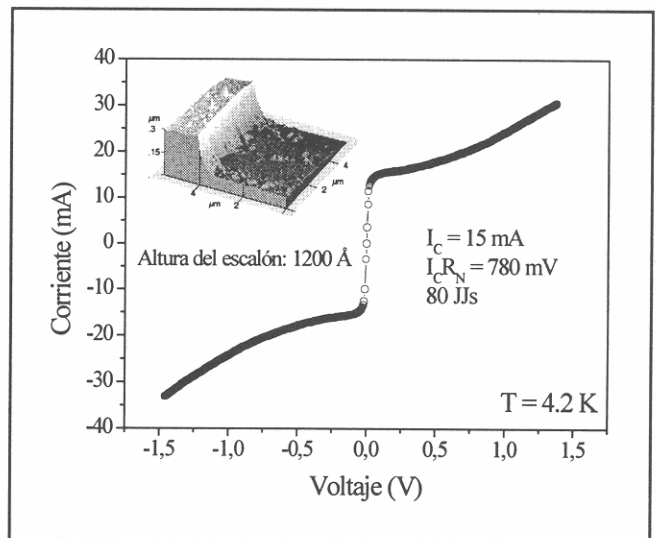


Figura 20. Curva I - V de una SSJJ de Bi-2212 / Bi-22Y2 con comportamiento tipo SNS. El inserto muestra una imagen de microscopía de fuerza atómica, AFM, sobre el escalón de Bi-22Y2. Las medidas ajustan al modelo RSJ con un valor del producto $I_c R_n$ de 780 mV a 4.2 K.

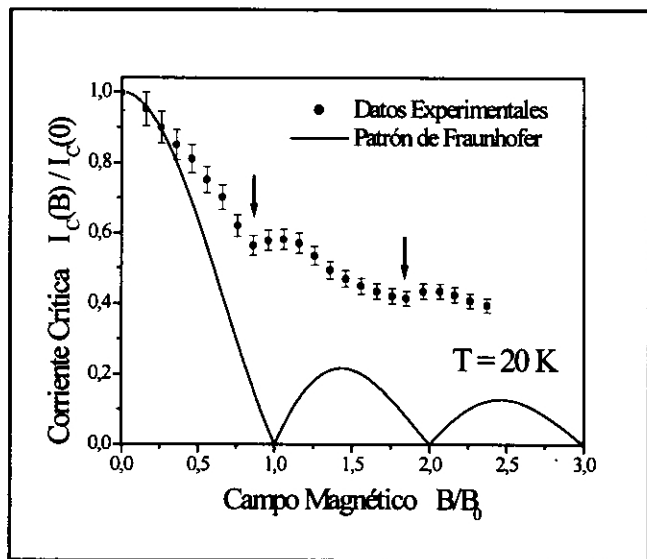


Figura 21. Dependencia de la corriente crítica con el campo magnético para una SSJJ de Bi-2212 / Bi-22Y2 a 20 K. Se puede observar una modulación de I_c con el campo magnético [Lopera *et al.* 1999].

las investigaciones en estos materiales han permitido hacer grandes avances en la fabricación de junturas Josephson de SATC con buenos resultados.

Las junturas Josephson de SATC presentan un curvas características I - V generalmente monovaluadas que ajustan muy bien con el modelo RSJ, a diferencia del comportamiento altamente histerético de las junturas SIS convencionales basadas en superconductores de baja temperatura. Sin embargo fenómenos como los escalones de Shapiro, y los patrones de Fraunhofer se han podido observar claramente en los dispositivos Josephson de SATC.

Un aumento importante en la eficiencia de las junturas Josephson basadas en YBCO se ha logrado mejorando las características superconductoras de este material dopándolo con plata. Se ha encontrado que el nivel óptimo de dopaje para obtener un producto $I_c R_n$ (figura de mérito) más alto corresponde a un 5 %.

La estructura altamente anisotrópica del Bi-2212 hace que este material se comporte como una pila de junturas Josephson en serie. Este comportamiento ha permitido el desarrollo de dispositivos de Efecto Josephson Intrínseco, donde una película delgada con un escalón de 120 nm de altura contiene unas 80 junturas en serie, cada una aportando un voltaje característico entre 9 y 10 mV, para

obtener un valor total entre 700 y 800 mV. Estos altos valores del producto $I_c R_n$, junto con otras características, hace que este tipo de dispositivos sean de sumo interés para el desarrollo de aplicaciones en electrónica y comunicaciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a COLCIENCIAS por el apoyo brindado a través del proyecto "Development of electronic devices based on HT_c thin films" contrato No. 1106-05 197-95.

Bibliografía

- Ambegaokar, V., & Baratoff, A. 1963. Tunneling between superconductors. *Phys. Rev. Lett.* 10 (11): 486-489
- Anderson, P. W., & Rowell, J. M. 1963. *Phys. Rev. Lett.* 10: 230
- Balsamo, E. P., Paternò, G., Barone A., Russo, M., & Vaglio, R. 1976. *phys. stat. sol. (a)* 35: K173-175
- Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. 1957. *Phys. Rev.* 108: 1175
- Barone, A., & Paternò, G. 1982. *Physics and Applications of the Josephson Effect*. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 13, 122
- Bednorz, J. G., & Müller, K. A. 1986. *Z. Phys. B* 64: 189
- Bolaños, G., den Ouden, G., Chacón M., Lopera, W., Gómez, M. E., Pulzara, A., Heiras, J., & Prieto, P. 1997. Grain Boundary Junctions with Ag-doped YBa₂Cu₃O_{7-x} epitaxial thin films. *Physica C* 282-287: 2419-2420
- Bolaños, G., Baca, E., Osorio, J., & Prieto, P. 2000. Improvement in the properties of Ag-doped YBa₂Cu₃O_{7-x} grain boundary Josephson junctions. *phys. stat. sol. (b)* 220 (1): 517-520
- Clarke, J. 1994. SQUIDS. *Sci. American* 271 (2): 46-53
- Crommie, M. F., & Zettl, A. 1991. *Phys. Rev. B* 43 (1): 408-412
- Faley, M. I., Poppe, U., Jia C. L., Glyantsev, V. N., Siegel, M., & Urban, K. 1994. *Physica C* 235-240: 591
- Finnegan, T. F., Denenstein, A., & Langenberg, D. N. 1971. *Phys. Rev. B* 4: 1487
- Josephson, B. D. 1962. *Phys. Lett.* 1: 251

- Kleiner, R., Steinmeyer, F., Kunkel, G., & Müller, P. 1992. Intrinsic Josephson effects in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystals. *Phys. Rev. Lett.* **68**: 2394-2397
- Lopera, W., Baca, E., Gómez, M.E., Prieto, P., Poppe, U., & Evers, W. 1999. Properties of Bi-2212/Bi-22Y2 step-stack Josephson junctions. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** (2): 4288-4291
- Lopera, W., Giratá, D., Osorio, J., & Prieto, P. 2000. Structural and electrical properties of grain boundary Josephson junctions based on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ thin films. *phys. stat. sol. (b)* **220** (1): 483-487
- Matisoo, J. 1980. The superconducting computer. *Sci. American* **242** (5): 50-65
- McCumber, D. E. 1968. *J. Appl. Phys.* **39** (6): 2503
- Merzbacher, E. 1961. *Quantum Mechanics*. Ed. Wiley, New York
- Preis, Ch., Sardar, M., & Keller, J. 1997. Parametric amplification of radiation by the intrinsic Josephson effect. *J. Appl. Phys.* **81** (1): 315-323
- Schlenga, K., Hechtfisher, G., Walkenhorst, W., Müller, P., Régi, F. X., Savary, H., Schneck J., Veith, M., Brodkorb, W., & Steinbeiss, E. 1995. Intrinsic Josephson junctions in high- T_c superconductors as high frequency sources. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (2)
- Shapiro, S. 1963. *Phys. Rev. Lett.* **11**: 80
- Shapiro, S., Janus, A. R., & Holly, S. 1964. *Rev. Mod. Phys.* **36**: 223
- Van Duzer, T., & Turner, C. W. 1981. *Principles of Superconductive Devices and Circuits*. Ed. Elsevier, New York. p. 184
- Vivas, P., Chacón, M., Gómez, M., & Prieto, P. 2000. Characterization of Josephson junctions for the elaboration of High- T_c SQUIDS. *phys. stat. sol. (b)* **220** (1): 503-507
- Walkenhorst, W., Hechtfisher, G., Schlötzer, S., Kleiner, R., & Müller, P. 1997. Probing the collective Josephson plasma resonance in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ by W-band-mixing experiments. *Phys. Rev. B* **56** (13): 8396-8403