



Modelo de los Dos Fluidos Modificado

Fluid Model of Two Modified

D. A. Landínez Téllez¹, J. Roa-Rojas¹, A. S. Mosquera Polo^{1,2}, C. E. De Luque Toro^{1,2},
Eiccer Perea de la Espriella^{1,2}

¹Grupo de Física de Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia,
AA 14490, Bogotá DC, Colombia

² Grupo de Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad del Magdalena, AA 10004, Santa Marta, Colombia

Recibido 22 de oct. 2007; Aceptado 2 de sep. 2009; Publicado en línea 30 de oct. 2009

Resumen

Se analizan datos experimentales de resistencia superficial en función de la temperatura para materiales superconductores con el modelo de los dos fluidos modificado en el cual se toma en cuenta la dependencia de la densidad de electrones superconductores y electrones de conducción normal con la temperatura y altas frecuencias y, se compara con el modelo clásico que funciona perfectamente para describir el comportamiento a frecuencias por debajo de la frecuencia del Gap de energía., presentando desviación el modelo clásico para altas frecuencias

Palabras claves: Modelo de los dos fluidos modificado, Superconductores, frecuencia, temperatura.

Abstract

A modified phenomenological model of surface resistance is proposed. Appreciable deviations between the predicted data using the classical two-fluid model and experimental data at higher frequencies were observed [Pippard (1954), Glover and Tinkham (1957)]. We introduce a modified two-fluid model in which both the temperature and frequency dependence of the superelectron density and of the normal electron density may be taken into account within the phenomenological framework [Zhou (1994a)]. Based on modified two-fluid model, we shall now study quantitatively the surface resistance of superconductor at high frequencies, especially close to the gap frequency of the superconductor.

Keywords: Modified two-fluid model, frequency, temperature, superconductors.

© 2009 Revista Colombiana de Física. Todos los derechos reservados.

1. Introducción

Los materiales superconductores son de gran interés por su multiplicidad de aplicaciones en ingeniería. Su utilidad es limitada por su resistencia superficial, la cual ha sido objeto de investigación desde el descubrimiento de la superconductividad hasta nuestros días, pero su estudio es complicado debido a su carácter fenomenológico. Se han desarrollado diversos modelos para explicar datos de resistencia superficial de materiales superconductores en función de la temperatura y la frecuencia; entre estos tenemos, el modelo clásico de los dos fluidos que funciona perfectamente a bajas frecuencias, para altas frecuencias se presenta a continuación el modelo modificado de los dos fluidos.

2. Discusión y resultados

El modelo clásico de los dos fluidos ha sido usado ampliamente y de manera satisfactoria para describir el comportamiento de superconductores a bajas frecuencias. Una apreciable desviación para altas frecuencias fue observada entre los datos predichos por este modelo y los datos experimentales [Pippard (1954), Glover y Tinkham (1957)]. Descubrimientos recientes muestran que mediciones de resistencia superficial de óxidos superconductores de alta temperatura crítica (SATC) con muy pequeñas longitud de coherencia, no siempre presentan una dependencia con el cuadrado de la

frecuencia (ω^2) como lo predice el modelo clásico en el rango de las frecuencias de los GHz. Se presenta un modelo modificado de los dos fluidos en el cual la densidad de electrones superconductores y la densidad de electrones de conducción normal dependen de la frecuencia y la temperatura [Zhou (1994a)]. Fenomenológicamente podemos asumir que estas densidades pueden ser descritas respectivamente por las siguientes relaciones:

$$\frac{n_s(t, \omega)}{n} = (1 - t^4)g(t, \omega) \quad (1);$$

$$\frac{n_n(t, \omega)}{n} = 1 - (1 - t^4)g(t, \omega) \quad (2)$$

donde $t = T/T_C$ es la temperatura normalizada, n es el número de electrones por unidad de volumen, n_s es el número de portadores superconductores por unidad de volumen y n_n es el número de portadores de conducción normal por unidad de volumen. Se introdujo la función $g(t, \omega)$ para tener en cuenta la variación de las densidades con la frecuencia, la forma de esta función es similar a la función característica de la probabilidad de ocupación de los pares de Cooper en la teoría BCS.

$$g(t, \omega) = 1 - 1/\sqrt{1 + \Gamma(\omega_g(t)/\omega)^\eta} \quad (3);$$

$$\omega_g(t) / \omega_g(0) = \sqrt{\cos(\pi t^2 / 2)} \quad (4)$$

donde Γ y η son dos parámetros fenomenológicos, relevantes a el material superconductor bajo consideración. La frecuencia del Gap de energía ω_g es generalmente una función de la temperatura como lo muestra la Ecuación (4). De la electrodinámica de superconductores encontramos que la corriente total es dada por la expresión:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = (\sigma_1 - i\sigma_2) \vec{E} \quad (5)$$

donde
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{DC}} = \frac{1 - (1 - t^4)g(t, \omega)}{1 + 4(\lambda_o/\delta_o)^4} \quad (6);$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_{DC}} = \frac{(1 - t^4)g(t, \omega) + 4(\lambda_o/\delta_o)^4}{\mu_o \omega \sigma_{DC} \lambda_o^2 (1 + 4(\lambda_o/\delta_o)^4)} \quad (7)$$

$\sigma_{DC} = n\tau_n e^2 / m_e$ es la conductividad-dc de el superconductor en el estado normal, $\lambda_o = (m_e / \mu_o n e^2)^{1/2}$ es la profundidad de penetración de el superconductor a cero absoluto, δ_o es una cantidad definida por

$$\delta_o = \sqrt{2/\mu_o \omega \sigma_{DC}} \quad (8)$$

Según el modelo de los dos fluidos la parte imaginaria (σ_2) de la conductividad compleja se relaciona con la profundidad de penetración London $\lambda_L(t, \omega)$ por medio de la expresión $\sigma_2 = (\omega \mu_o \lambda_L^2)^{-1}$ y haciendo uso de las anteriores relaciones obtenemos:

$$\lambda_L(t, \omega) = \frac{\lambda_o \sqrt{1 + 4(\lambda_o/\delta_o)^4}}{\sqrt{(1 - t^4)g(t, \omega) + 4(\lambda_o/\delta_o)^4}} \quad (9)$$

La dependencia de $\lambda_L(t, \omega)$ con la frecuencia ha sido demostrada experimentalmente para frecuencias muy por encima de los 500 GHz [Nuss et al. (1991)]. De acuerdo al modelo modificado de los dos fluidos [1] la resistencia superficial normalizada puede ser obtenida por:

$$\frac{R_s}{R_{sn}} = \frac{2(\lambda_L/\delta_o)^2}{1 + 4(\lambda_L/\delta_n)^4} \times \frac{2\gamma_o(\lambda_L/\delta_n)^2 - \gamma_I}{\gamma_{oN} - 2\gamma_{IN}(\lambda_o/\delta_o)^2} \quad (10)$$

Donde $\gamma_o, \gamma_I, \gamma_{oN}$ y γ_{IN} son parámetros dados por las siguientes expresiones:

$$\gamma_o = \frac{1}{\sqrt{2}\lambda_L} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 4(\lambda_L/\delta_n)^4}} \quad (11);$$

$$\gamma_I = \frac{1}{\sqrt{2}\lambda_L} \sqrt{\sqrt{1 + 4(\lambda_L/\delta_n)^4} - 1}$$

(12)

$$\gamma_{oN} = \frac{1}{\delta_o \sqrt{1 + 4(\lambda_o/\delta_o)^4}} \sqrt{2(\lambda_o/\delta_o)^2 + \sqrt{1 + 4(\lambda_o/\delta_o)^4}} \quad (13)$$

$$\gamma_{IN} = \frac{1}{\delta_o \sqrt{1 + 4(\lambda_o/\delta_o)^4}} \sqrt{\sqrt{1 + 4(\lambda_o/\delta_o)^4} - 2(\lambda_o/\delta_o)^2} \quad (14)$$

En el modelo clásico de los dos fluidos el valor de la función g es uno, y la resistencia superficial normalizada es dada por:

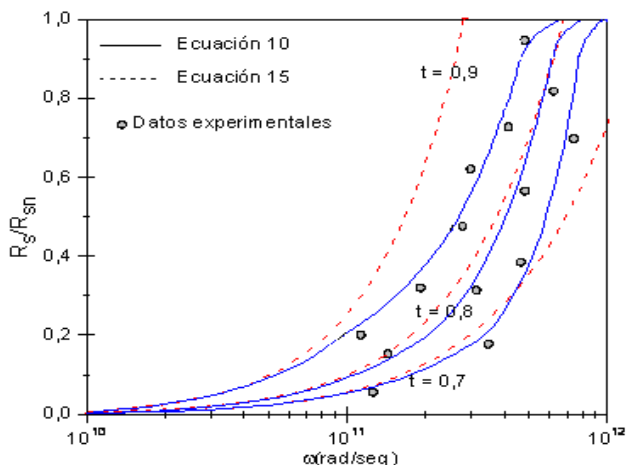


Figura 1. Datos de Resistencia Superficial normalizada en función de la frecuencia, simulados con el modelo modificado de los dos fluidos (líneas continuas) y el modelo clásico de los dos fluidos (líneas punteadas) para valores de la temperatura normalizada $t = 0.7$, $t = 0.8$ y $t = 0.9$.

$$\frac{R_s}{R_{sn}} = 2 \left(\frac{\lambda_L}{\delta_o} \right)^2 \frac{2\gamma_o \delta_o (\lambda_L / \delta_n)^2 - \gamma_I \delta_o}{1 + 4(\lambda_L / \delta_n)^4} \quad (15)$$

donde δ_n es la profundidad skin normal $\delta_n = (2 / \mu_o \omega \sigma_n)^{1/2}$ y $\lambda_L = \lambda_o / \sqrt{1 - t^4}$ en el modelo clásico de los dos fluidos. La figura 1 ilustra el comportamiento de la resistencia superficial normalizada, predicha con el modelo clásico de los dos fluidos (líneas punteadas) y el modelo modificado de los dos fluidos (líneas continuas) en función de la frecuencia para distintos valores de la temperatura normalizada ($t = 0.7$, $t = 0.8$, $t = 0.9$), coincidiendo los modelos a frecuencias bajas. A frecuencias altas solo el modelo modificado de los dos fluidos muestra concordancia con los datos experimentales. Los datos corresponden al aluminio en su estado superconductor con $T_c = 1.178K$; $\omega_g(0) = 4.93 \times 10^{11}$ rad/s; $\sigma_{DC} = 6.8 \times 10^8 / \Omega m$; $\lambda_o = 50nm$; $\Gamma = 100$; $\eta = 12$.

La figura 2 muestra como el modelo modificado de los dos fluidos se ajusta con buena aproximación a datos experimentales de este mismo material en función de la temperatura normalizada para dos frecuencias comparables (igual orden de magnitud $\approx 10^{11}$) a la frecuencia del Gap de energía, la primera (línea punteada) con una frecuencia menor a la frecuencia del Gap de energía y la segunda (línea continua) para una frecuencia mayor a la frecuencia del Gap de energía [Biondi y Garfunkel (1959)].

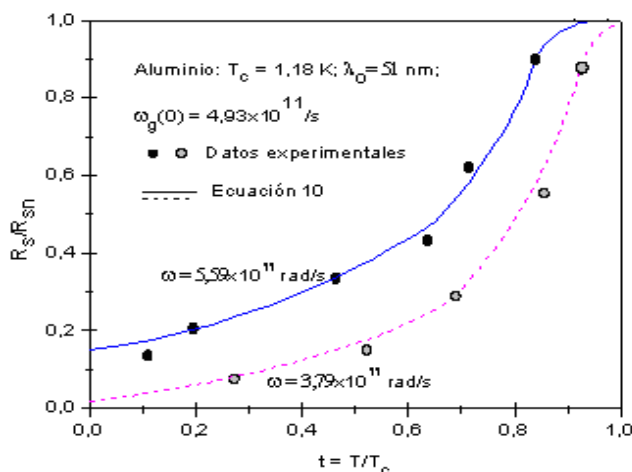


Figura 2. Datos de Resistencia Superficial normalizada en función de la temperatura, simulados con el modelo modificado de los dos fluidos (líneas continuas) para valores de la frecuencia del orden de la frecuencia del Gap de energía.

Conclusiones

El modelo modificado de los dos fluidos reproduce con bastante aproximación datos de resistencia superficial en función de la temperatura y la frecuencia, aun para frecuencias comparables a la frecuencia del Gap de energía, mientras que el modelo clásico solo es útil para frecuencias por debajo y no comparables con la frecuencia del Gap. La densidad de electrones superconductores y electrones de conducción normal se ve fuertemente influenciada por la frecuencia cuando esta es comparable a la frecuencia del Gap de energía del material, lo cual modifica la Longitud de Penetración London y resistencia superficial del material superconductor.

Agradecimientos

Este trabajo tuvo el apoyo parcial de Colciencias, proyecto No. 1101-06-17622, del Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, contrato 043-2005 y de Fonciencias de la Universidad del Magdalena, proyecto No 002 -2007.

Referencias

[1] Electrodynamics of Solids and Microwave Superconductivity, Shu-Ang Zhou, Copyright © 1999 John Wiley & Sons, Inc.
 [2] Pippard, A.B., Adv. in Electronics & Electron Phys. (ed. L. Marton) vol. 6, 1-45 (1954).
 [3] Zhou, S.-A.,/. Tech. Phys. 35, 161 (1994a).
 [4] Glover, R.E. and Tinkham, M., Phys. Rev. 108, 243 (1957).
 [5] Nuss, M.C, Mankiewich, P.M., O'Malley, M.L., Westwick, E.H. and Littlewood, P.B., Phys. Rev. Lett. 66, 3305 (1991).
 [6] Biondi, M.A. and Garfunkel, M.P., Phys. Rev. Lett. 2 (1959) 143-145.