Revista Colombiana de Física, Vol. 42, No. 2 de 2010.

Efectos de Interfase en Sistemas Híbridos Superconductor-Superconductor y Superconductor-Metal

Interface Effects in Superconductor-Superconductor and Superconductor-Metal Hybrid Systems

J. Barba-Ortega* [a], F. Rondano[b], J. D. González[b]

[a] *Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.*
[b] *Grupo Teoría de la Materia Condensada, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.*

Recibido 14.04.10; Aceptado 06.11.10; Publicado en línea 17.01.11.

Resumen

Las ecuaciones Ginzburg - Landau dependientes del tiempo (TDGL) son resueltas para estudiar las propiedades de una lámina superconductora mesoscópica con sus superficies en contacto con diferentes materiales. Las propiedades de estos materiales son tomadas en cuenta por medio de las condiciones de frontera de de Gennes vía longitud de extrapolación b. Las TDGL son resueltas considerando el parámetro de orden y el campo magnético invariante a lo largo del eje z y se asume que el campo magnético externo es aplicado paralelamente a las interfases de la lámina (eje z). Se calcula la distribución espacial de la densidad de electrones superconductores y las curvas de magnetización usando un método numérico basado en la técnica de variables de enlace. Nuestro trabajo muestra el límite b de ocurrencia de una cadena de vórtices en una lámina de área $d_x \times d_y$. Además se obtiene una ley de potencias para el parámetro de orden y una dependencia logarítmica para la curva de magnetización en el límite $b \to 0_-$ (interfase superconductor - superconductor a temperatura crítica muy elevada ($T_c \to \infty$)).

Palabras Clave: Ginzburg-Landau, Mesoscópico, Superconductor, Parámetro de de Gennes.

Abstract

The time dependent Ginzburg-Landau equations (TDGL) are solved to study the properties of a mesoscopic superconducting film with both surfaces in contact with different materials. The properties of these materials are taken into account by the de Gennes boundary conditions via the extrapolation length b. The TDGL are solved upon taking the order parameter and the magnetic field invariant along z-direction, and it is assumed that the external magnetic field is parallel to the multilayer interfaces (z-axis). We calculate the superconducting electron density and the magnetization curves using a numerical method based on the technique of gauge invariant variables. Our work determines the b-limit for the occurrence of a vortex chain in a film of area $d_x \times d_y$. Also, we obtain a power-law of order parameter and a logarithmical dependence of the magnetization curve parameter in limit $b \to 0_-$(superconductor - superconductor interface at high critical temperature ($T_c \to \infty$)).

Keywords: Ginzburg-Landau, Mesocopics, Superconductor, deGennes Parameter.
PACS: 74.20.De, 74.25.Ha, 74.70.Ad.

©2010. Revista Colombiana de Física. Todos los derechos reservados.

1. Introducción

El estudio del estado de vórtices en superconductores mesoscópicos ha sido de gran interés en las últimas décadas debido al gran rango de aplicaciones tecnológicas [1-9]. Estos materiales muestran una sorprendente gama de patrones de vórtices, que se forman debido a la interacción repulsiva entre los vórtices y el confinamiento producido por el campo magnético externo. Recientemente, las configuraciones de vórtices han sido estudiadas en triángulos superconductores

*jjbarbao@unal.edu.co

[10-11], láminas, cuadrados y rectángulos [3,4], usando a su vez la teoría Ginzburg-Landau [12-14] o la aproximación de London [15]. En sistemas mesoscópicos la configuración de vórtices obedece a la geometría de la muestra para baja vorticidad, mientras, para sistemas volumétricos y de alta vorticidad, una red hexagonal, conocida como red de Abrikosov aparece en la muestra, lejos de la frontera. También ha sido de gran interés estudiar el efecto de proximidad debido a la presencia de materiales en contacto con el superconductor. Se ha analizado la incidencia de materiales metálicos, ferromagnéticos sobre grandezas termodinámicas como magnetización, energía libre, número de vórtices entre otras [16-17]. En estos estudios, el medio donde la muestra superconductora es sumergida es tomado en cuenta aplicando las condiciones de contorno de de Gennes vía la longitud de extrapolación b. Para una lámina superconductora en contacto con otro superconductor a mayor temperatura crítica, la curva de magnetización depende linealmente del parámetro de de Gennes y la densidad de electrones superconductores o pares de Cooper presenta una ley de potencias. Además, cuando la lámina está rodeada por un material metálico podemos determinar el diagrama de fase para la ocurrencia de una sola cadena de vórtices.

2. Formalismo Teórico

Estudiamos las propiedades superconductoras de una lámina rodeada por diferentes tipos de materiales. Las propiedades de cada material son tomadas en cuenta por medio de la longitud de extrapolación b, la cual, fenomenológicamente, identifica las diferentes condiciones de contorno. Una transición superconductor-vacío es simulada para $b \to \infty$. La condición $b > 0$ identifica una interfase superconductor-metal. $b < 0$ aumenta la superconductividad en las fronteras, debido a que simula la presencia de otro superconductor a mayor temperatura crítica en contacto con la muestra superconductora. El caso $b = 0$ es tomado en cuenta al simular una interfase superconductora con alta densidad de defectos. En nuestro análisis el campo magnetico externo es aplicado a lo largo del eje z, resolvemos las ecuaciones Ginzburg-Landau dependientes del tiempo para superconductores isotrópicos, las cuales describen el comportamiento del parámetro de orden superconductor Ψ y del potencial vectorial $\mathbf{A}$ (vea referencia [18]). Resolvemos estas ecuaciones discretamente usando el método de variables de enlace o método $U - \psi$, en el cual dos variables complejas U_x y U_y son introducidas para preservar la invariancia de calibre [14,18]. El método $U - \psi$ es usado para obtener una mejor convergencia numérica para campos magnéticos de gran magnitud y garantizar la invarianza de calibre [19-20]. En nuestra simulación usamos el método de Euler con un espaciamiento de red igual a $a_x = a_y = 0{,}3$, para una muestra de tamaño $d_y = 80\xi(0)$ y d_x varía discretamente desde $d_x = 20\xi(0)$ a $3\xi(0)$, con una temperatura $T = 0$ y un valor fijo para $\kappa = 22$.

3. Resultados y Discusión

Estudiamos una lámina superconductora rodeada, primero por un material metálico, y luego por un superconductor a mayor emperatura crítica. Resolvemos las TDGL para determinar el límite b para la nucleación de una cadena de vórtices en una lámina mesoscópica de area $d^2 = d_x \times d_y$, con $d_y = 80\xi(0)$ y $20\xi(0) > d_x > 3\xi(0)$ en presencia de un campo magnético perpendicular a la superficie de la lámina. En el primer caso tomamos valores de $b > 0$ y en el segundo $b < 0_-$ es decir, valores negativos de b acercándose a cero.

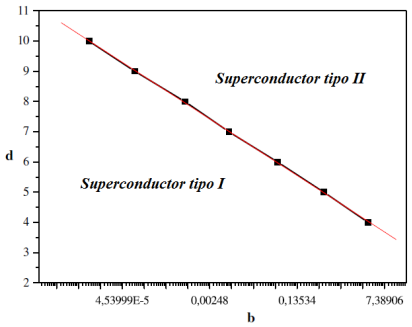

Fig. 1: Tamaño de la muestra como función del parámetro b para la ocurrencia de una cadena de vórtices.

En la figura 1 se presenta el diagrama de fase del tamaño d en función del parámetro b. Para siete muestras con $d_x = 4\xi(0)$, $5\xi(0)$, $6\xi(0)$, $7\xi(0)$, $8\xi(0)$ y $9\xi(0)$, encontramos $b = 3\xi(0)$, $0{,}45\xi(0)$, $0{,}055\xi(0)$, $0,006\xi(0)$, $0{,}0008\xi(0)$, $0{,}00008\xi(0)$ y $0{,}000001\xi(0)$ respectivamente. Podemos apreciar un comportamiento lineal de d como función del logaritmo de b.

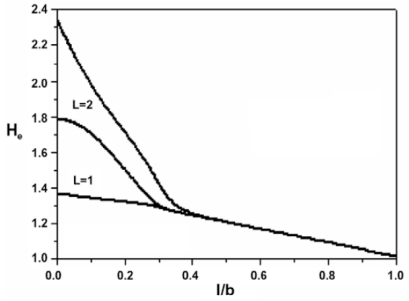

Fig. 2: Diagrama de fase $H_e - 1/b$, para $d_x = 4\xi(0)$

En la figura 2 se muestra el diagrama de fase $H_e - 1/b$ para una muestra con $d_x = 4\xi(0)$. Se observa que, para $0 < 1/b < 0{,}35$ una cadena de vórtices entra en la muestra.

Para $0{,}35 < 1/b < 0{,}42$ la transición entre el estado Meissner y el estado mixto ocurre con la entrada de dos cadenas de vórtices. Finalmente para $1/b > 0{,}42$ la muestra se comporta como un superconductor tipo I sin la presencia de ninguna cadena de vórtices. Para las muestras con $d_x < 4\xi(0)$ no observamos la formación de ninguna cadena de vórtices debido a restricciones de tamaño [9].

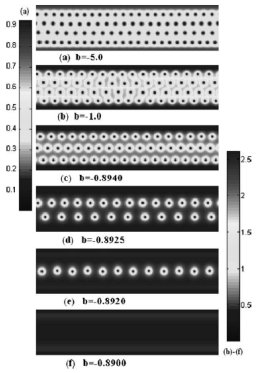

Fig. 3: Configuración de vórtices para $d_x = 20\xi(0)$
(a) $b = -5{,}0\xi(0)$, (b) $b = -1{,}0\xi(0)$, (c) $b = -0{,}8945\xi(0)$,
(d) $b = -0{,}89255\xi(0)$, (e) $b = -0{,}89205\xi(0)$, y
(f) $b = -0{,}895\xi(0)$

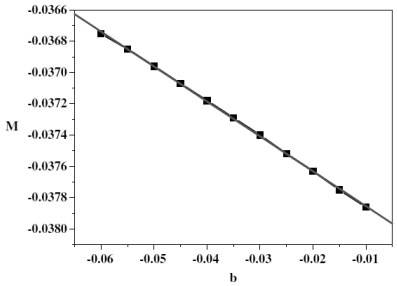

Fig. 4: Curva de magnetización en función de b, para para $H_e = 0{,}42H_{c2}(0)$ y $d_x = 20\xi(0)$.

A continuación analizamos la lámina superconductora rodeada por otro superconductor a mayor temperatura crítica, es decir tomamos valores para $b < 0$. La figura 3 muestra la configuración de vórtices para seis láminas homogéneas de espesor $d_x = 20\xi(0)$ y (a) $b = -5{,}0\xi(0)$, (b) $b = -1{,}0\xi(0)$, (c) $b = -0{,}8945\xi(0)$, (d) $b = -0{,}89255\xi(0)$, (e) $b = -0{,}89205\xi(0)$ (f) $b = -0{,}895\xi(0)$ respectivamente. La configuración de vórtices calculada muestra cambios en el número de cadenas de vórtices de N a $N + 1$. Para $b > -0{,}895\xi(0)$ la muestra permanence en estado Meissner, mientras que para $b < -1{,}0\xi(0)$ el número de cadenas de vórtices permanence constante e igual a $N = 4$, pero con diferente vorticidad (L), $L = 66$ para $b = -1{,}0\xi(0)$ y $L = 88$ para $b = -5{,}0\xi(0)$.

Una rápida secuencia de transiciones entre cadenas de vórtices puede observarse en un pequeño intervalo de N $(N = 0 \to 1 \to 2 \to 3 \to 4)$ en un pequeño intervalo de b $(b = -0{,}895\xi(0) \to -0{,}8920\xi(0) \to -0{,}8925\xi(0) \to -0{,}895\xi(0) \to -1{,}0\xi(0))$. Podemos explicar este comportamiento notando que, cuando b se acerca a cero por la izquierda, el parámetro de orden, cerca a la frontera, incrementa su valor por efectos de proximidad, los pares de Cooper de la muestra son contaminados por la presencia del superconductor de mayor temperatura crítica, resultando en un rápido aumento de la superconductividad en la muestra y un rápido decrecimiento en el número de cadenas de vórtices. La curva de magnetización y el ajuste lineal (línea roja) como función de b son mostrados en la figura 4. Podemos apreciar un comportamiento lineal de $M(b)$ en el intervalo [-0.01,-0.06], con $m = -0{,}02 \pm 0{,}0001$ siendo la pendiente. En este intervalo la muestra permanece siempre en estado Meissner y éste será cada vez más pronunciado para valores menores de $|b|$.

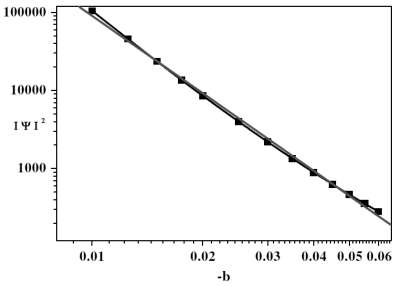

Fig. 5: Densidad de pares de Cooper como función de b, para $H_e = 0{,}42H_{c2}(0)$ y $d_x = 20\xi(0)$.

La densidad de los pares de Cooper como función de b se muestra en la figura 5. Podemos observar una ley de potencias en el intervalo [-0.01,-0.06] con una pendiente $m = -3{,}29 \pm 0{,}04$.

La figura 6 muestra la configuración de vórtices para nueve láminas homogéneas de espesor $d_x = 5\xi(0)$, $6\xi(0)$, $8\xi(0)$, $10\xi(0)$, $12\xi(0)$, $14\xi(0)$, $16\xi(0)$, $18\xi(0)$ y $20\xi(0)$ para $b = -10\xi(0)$ y $H_e = 0{,}42H_{c2}(0)$. Similarmente, la configuración de vórtices muestra un reordenamiento de las cadenas de vórtices cuando el número de cadenas cambia de $0 \to 1 \to 2 \to 4$. Para $d_x = 5\xi(0)$ la muestra permanece en estado Meissner, mientras que para $d_x = 6\xi(0)$ el sistema se cristaliza en una sola cadena. Incrementando el espesor de la lámina, ocurre una transición en forma de zig-zag y la cadena se divide en otras dos. Luego, aumentando un poco más el espesor de la muestra, ocurre una transicion de $2 \to 4$ cadenas. Las interfases superconductor-superconductor ocasionan un aumento en la barrera de energía, resultando en una fuerte compresión de los vórtices dentro de la lámina. Sin embargo las láminas de espesor $d_x < 5\xi(0)$ no permiten la formación de ninguna cadena de vórtices para ningún campo magnético, por lo tanto el campo magnético penetra la

muestra de forma continua, comportándose igualmente como un superconductor tipo I. Posteriormente, determinamos el límite de ocurrencia de un estado de sólo una cadena de vórtices en la muestra de tamaño $5\xi(0) \times 80\xi(0)$ en un campo aplicado de $H_e = 0{,}42Hc_2(0)$, siendo $b = -1{,}0\xi(0)$.

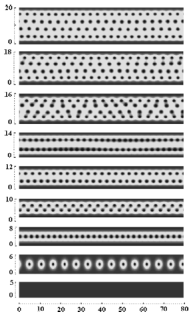

Fig. 6: Configuración de vórtices para $H_e = 0{,}42H_{c2}(0)$, $b = 10$ y $d_x = 20\xi(0)$; $18\xi(0)$; $16\xi(0)$; $14\xi(0)$; $12\xi(0)$; $10\xi(0)$; $8\xi(0)$; $6\xi(0)$ y $5\xi(0)$.

4. Conclusiones

En este trabajo se llevó a cabo un estudio del estado de vórtices en una lámina superconductora mesoscópica sometida a un campo magnético homogéneo externo con dos de sus superfices en contacto con dos diferentes tipos de materiales (un metal y un superconductor a mayor temperatura crítica). En el caso de la lámina superconductora rodeada por un material metálico, determinamos el límite de ocurrencia del estado de una sola cadena de vórtices como función del parámetro de de Gennes. Observamos un comportamiento lineal de lnb como función del tamaño de la muestra y encontramos que, en muestras con $d_x < 4\xi(0)$ no es posible la formación de ninguna cadena de vórtices debido a restricciones de tamaño. En láminas superconductoras en contacto con un superconductor a mayor temperatura crítica, observamos una secuencia de transición de cadena de vórtices al disminuir el valor de $|b|$. Nuestros resultados muestran similitudes con trabajos experimentales, donde picos en la curva de magnetización están asociados con transiciones entre diferentes cadenas de vórtices. Además encontramos una dependencia lineal de la magnetización y una ley de potencias para la densidad de pares de Cooper en función del parámetro de de Gennes en el limite $b \to 0_-$. De otra parte, obtenemos valores del parámetro de orden mucho mayores que la unidad así, puesto que no hay materiales conocidos con T_c infinita, el límite $b \to 0_-$ es imposible físicamente. Además encontramos el límite de ocurrencia del estado de una simple cadena vórtices. Este límite ocurre para una muestra de $5\xi(0) \times 80\xi(0)$, un campo aplicado de $H_e = 0{,}42H_{c2}(0)$ y un parámetro $b = -10\xi(0)$. El límite para el parámetro b, en el caso de una muestra de $20 \times 80\xi(0)$ y un campo magnético aplicado igual a $H_e = 0{,}42H_{c2}(0)$ es $b = -0{,}892\xi(0)$. Hasta el presente momento no conocemos ningún reporte en la literatura científica de la relación de b con la temperatura crítica del material ni de su relación con los metales.

Referencias

[1] L. R. E. Cabral, B. J. Baelus and F. M. Peeters, Phys. Rev.B 70 (2005), 144523.

[2] V. R. Misko, V. M. Fomin, J. T. Devreese and V. V. Moschalkov, Phys. Rev. Lett. 90, (2005), 147003.

[3] C.C de Souza Silva and J. Albino Aguiar, Physica C 354, 232, (2001). Physica C 404, 11, (2004).

[4] G. Carneiro, Phys. Rev.B 57 (1998), 6077.

[5] I. V. Schweigert, V. A. Schweigert and F. M. Peeters, Phys. Rev. B 60, 14665 (1999).

[6] S. H. Brongersman, E. Verweij, N. J. Koeman, D. G. de Groot, R. Griessen and B. I. Ivlev, Phys. Rev. Lett 71, 2319 (1993).

[7] V.V. Moschalkov, X. Qui, V. Bruyndoncz, Phys. Rev. B. 55, 211739 (1997).

[8] N. Lisboa, A. L. Malvezzi and E. Sardella, Physica B 403, 1494, (2008).

[9] E. Sardella, A. L. Malvezzi, P. N. Lisboa, and Wilson Ortiz, Phys. Rev.B 74 014512 (2006).

[10] B. J. Baelus and F. M. Peeters, Phys. Rev.B 65 (2002), 104515.

[11] L. F. Chibotaru. A. Ceulemans, V. Bruyndoncx and V. V. Moschalkov, Phys. Rev. Lett. 86, (2001), 1323.

[12] A. A. Abrikosov, Soviet Phys. JETP 5, 1174 (1957), Ibid. Phys. Chem. Solids 2 (1957), 199.

[13] E. H. Brandt, Rep. Prog. Phys. 58 (1995) 1465.

[14] G.C. Buscaglia, C. Bolech, and A. López, Connectivity and Superdonductivity, J. Berger and J. Rubinstein. (Eds.) Springer, 2000.

[15] V. Oboznov and I. V. Grigorieva, europhys. Lett. 83 (2008) 17008.

[16] J. J. Barba, C. C. Souza, L. R. E Cabral and J. Albino Aguiar, Physica C, 468, (2008), 718.

[17] J. J. Barba and Albino Aguiar, Physica C, 469, (2009), 754.

[18] D. Gropp, H. G. Kaper, G. K. Leaf, D. M. Levine, M. Palumbo, and V. M. Vinokur, J. Comput. Phys. 123, 54 (1996).

[19] J. J. Barba and Albino Aguiar, J. Physics: Conference Series 150 (2009), 052015.

[20] J. J. Barba, L. R. E. Cabral and Albino Aguiar, J. Physics: Brazilian Journal of Physics 36 (2006), 1029.