REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA, VOL. 34, No. 1, 2002

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN SUPERCONDUCTORES DE CAPAS EN ESTADO DE VORTICES

Ricardo Vega Monroy
Universidad del Atlántico, Departamento de Física,
Km 7 antigua vía a Puerto Colombia, A. A. 1890, Barranquilla

RESUMEN
En el modelo de Drude-Lorentz es presentado el análisis sobre la propagación de ondas electromagnéticas transversales en superconductores de capas en estado de vortices a lo largo de un campo magnético externo. Es obtenida la ley de dispersión de ondas que presentan un comportamiento no peculiar con frecuencia inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la intensidad del campo magnético. Es mostrado, desde el punto de vista fenomenológico en el límite superlimpio, que este comportamiento es debido a que la localización de electrones cerca de los vortices en los planos superconductores crea resonancias que propician la propagación de ondas transversales a las capas del superconductor.

INTRODUCCIÓN
Después del descubrimiento de la superconductividad a altas temperaturas, los estudios de propagación de ondas electromagnéticas en superconductores han jugado un papel muy importante en la física del estado sólido. La naturaleza cuasibidimensional de los superconductores de altas temperaturas es favorable para excitaciones colectivas que son imposibles en superconductores tridimensionales [1,2].

En los últimos años, trabajos experimentales en superconductores de altas temperaturas han mostrado singularidades no comunes en la electrodinámica de estos materiales. En particular, absorciones magnéticas resonantes fueron observadas en estructuras superconductoras de altas temperaturas en estado de vortices [2,3]. En estos experimentos la presencia de un campo magnético externo que junto con un campo electromagnético crean nuevas excitaciones que poseen un comportamiento "anticiclotrónico" como han sido llamadas. La propiedad mas peculiar es que la frecuencia resonante decrece con el incremento del campo magnético. Estas excitaciones contradicen el conocido teorema de Kohn que dice que la única respuesta de un sistema electrónico a un campo magnético externo y un campo electromagnético ac es el movimiento ciclotrónico de los electrones con frecuencia proporcional a la intensidad del campo magnético.

Existen varias teorías que tratan de describir este fenómeno, entre las cuales la mas utilizada por los experimentalitas para explicar sus observaciones es la teoría sobre excitaciones de plasma de Josephson en un campo magnético [4,5], pero en la actualidad este problema no está aun resuelto.

El propósito de este trabajo es mostrar en una primera aproximación desde el punto de vista fenomenológico que las mencionadas excitaciones "anticiclotrónicas" no son mas que excitaciones colectivas propiciadas por la localización de electrones en las capas superconductoras en las cercanías de vortices.

El modelo a considerar consiste en arreglo infinito de capas superconductoras bidimensionales localizadas en la posición $z=na$, siendo $n=0, 1,..$ y a la distancia entre las capas adyacentes. Comencemos nuestro análisis con las ecuaciones para un campo electromagnético, que actúa en el sistema superconductor de capas. La distancia entre los planos superconductores es suficientemente grande, de tal manera que despreciamos el paso de electrones de una capa a otra y los electrones de diferentes capas están acoplados a través del campo electromagnético. Si el campo magnético externo está orientado perpendicular a los planos superconductores. La ley de dispersión viene dada por la ecuación

$$\det\left[\delta_{\alpha\beta} - \sigma_{\alpha\beta}(\mathbf{q},\omega,H)U_{\alpha\beta}S(\mathbf{q},k,\omega)\right]E_{\beta}(\mathbf{q},k,\omega) = 0 \tag{1}$$

Donde $\sigma_{\alpha\beta}$ es el tensor de conductividad, $S(\boldsymbol{q},k,\omega)=\sinh q_{\omega}a/(\cosh q_{\omega}a-\cos ka)$ es un factor de forma, $U_{\alpha\beta}$ son coeficientes que resultan de las ecuaciones de Maxwell y E_{β} son las componentes del campo eléctrico. $\mathbf{q}$, k son el vector de onda en el plano y su componente transversal respectivamente. Como podemos ver de la ecuación (1), la magnitud $\sigma_{\alpha\beta}$ tiene una forma arbitraria. Por consiguiente, la solución de este sistema de ecuaciones depende de la forma concreta del tensor de conductividad.

Para obtener la respuesta de una capa superconductora bidimensional en presencia de un campo magnético estático y excitada por campo electromagnético ac $E = E_o e^{i\omega t}$, partamos de la ecuación para el movimiento de en gas electrónico sobre el cual actúa una fuerza externa inducida por vortices

$$\sum_{\beta}\left(\delta_{\alpha\beta} - Q_{\alpha\beta}\right)E_{\beta} = 4\pi\frac{\omega_B}{\omega^2}j_{\alpha} \tag{2}$$

Siendo $\omega_B=\kappa\delta(\mathbf{r})$, $\kappa=h/2m$ es el quanta de circulación. j_{α} son corrientes de Meisner provocadas por la inducción de los vortices. Las componentes del tensor $Q_{\alpha\beta}$ son

$$Q_{xx} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \qquad Q_{xy} = i\frac{\omega_c}{\omega}, \qquad Q_{xx} = Q_{yy}, \qquad Q_{xy} = -Q_{yx} \tag{3}$$

Siendo ω_p, ω_c las frecuencias de plasma bidimensional y ciclotrónica respectivamente. La ecuación no homogénea (2) es el producto de la presencia de δ-fuerzas en el gas provocadas por los vortices. La forma de estas fuerzas en el limite superlimpio, o sea en el cual despreciamos el efecto de pinning y viscosidad y se puede considerar que los vortices se mueven por inercia compensadas por la fuerza de Lorentz $F = \rho\left[\boldsymbol{\kappa}\times\mathbf{v}_s\right]$. ρ y $\mathbf{v}_s$ son la densidad de carga y la velocidad de los superelectrones.

De la ecuación (2) obtenemos la respuesta del gas cuasibidimensional en forma de ley de Ohm $j_{\alpha} = \sigma_{\alpha\beta}E_{\beta}$, donde las componentes del tensor $\sigma_{\alpha\beta}$ son

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{4\pi}\frac{\left(\omega^2 - \omega_p^2\right)}{\omega_B}, \qquad \sigma_{xy} = i\frac{1}{4\pi}\frac{\omega_c\omega}{\omega_B} \tag{4}$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy}, \qquad \sigma_{xy} = -\sigma_{yx} \tag{5}$$

Después de la sustitución de (4) y (5) en (1), tenemos dos ecuaciones cuadráticas que determinan las leyes de dispersión de ondas electromagnéticas en dirección perpendicular a los planos superconductores.

En el límite cuando $\omega \to \omega_p$, existe una única solución a lo largo del campo magnético

$$\omega = \frac{2c}{a}\sqrt{\frac{\omega_B}{\omega_c}}\sin\tfrac{ka}{2} \tag{6}$$

De (6) observamos que la frecuencia de la onda es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la intensidad del campo magnético $1/\sqrt{H}$, dependencia que ha sido observada experimentalmente en superconductores del tipo BiSrCaCuO [1,2].

El análisis anterior ha mostrado desde el punto de vista fenomenológico que a lo largo de un campo magnético externo pueden propagarse ondas electromagnéticas que aparecen como resultado de resonancias de plasma a lo largo de la estructura y propiciadas por la localización de electrones superconductores en las cercanías de los vortices inducidos por el campo en la muestra. Como hemos visto el salto del electrón pasando a moverse alrededor de los vortices con frecuencia ω_B crea nuevas frecuencias resonantes en las capas del superconductor que favorecen las resonancias longitudinales, perpendiculares a los planos superconductores.

Al contrario de la teoría de resonancias de plasma de Josephson [4,5] en la cual se considera que la causa de las resonancias observadas experimentalmente provienen de movimientos de electrones fuera de los planos superconductores, nosotros creemos que dichas resonancias son el producto de movimientos electrónicos en las capas superconductoras, lo que se puede ver de la relación de dispersión (6) si $\omega_B \to 0$. En este caso el modo a lo largo del campo magnético desaparece.

REFERENCIAS

[1] Y. Matsuda et al., Phys. Rev. Lett. 78, 1972 (1997).

[2] O.K.C Tsui et al., Phys. Rev. Lett. 73, 724 (1994).

[3] Y. Matsuda et. Al., Phys. Rev.Lett. 75, 4512 (1995).

[4] L.N. Bulaevskii et al., Phys. Rev. B 53, 14601 (1996).

[5] L.N. Bulaevskii et al. Phys. Rev. B 54, 7221 (1996).