

## РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ МАГНЕТИЗМ ЭЛЕКТРОН-ДЫРОЧНЫХ КАПЕЛЬ

*А.С.Каминский, Я.Е.Покровский*

Оценен магнитный момент электрон-дырочных капель, возникающий в магнитном поле за счет рекомбинационного потока носителей заряда с поверхности вглубь капель. Взаимодействие этого момента с переменным магнитным полем приводит к характерному резонансному поглощению.

Рекомбинация носителей заряда внутри электрон-дырочных капель (ЭДК) [1] приводит к появлению потока электронов и дырок с поверхности вглубь капель. При стационарном возбуждении величину этого потока можно оценить из уравнения непрерывности

$$\operatorname{div} (n_0 v_r) = -n_0 / \tau_0. \quad (1)$$

Здесь  $n_0$  — концентрация,  $v_r$  — радиальная составляющая скорости электронов и дырок;  $\tau_0$  — время жизни ЭДК. Считая, что концентрация  $n_0$  изменяется незначительно, можно получить из (1)

$$v_r = -r / 3\tau_0, \quad (2)$$

где  $r$  — радиус-вектор с началом в центре ЭДК.

В однородном магнитном поле  $\mathbf{H}_0$ , направленном вдоль оси  $z$ , на электроны и дырки, движущиеся от периферии к центру ЭДК, действует сила Лоренца, вызывающая вращение электронов и дырок относительно оси  $z$  в противоположные стороны. Такие круговые потоки носителей заряда приводят к появлению магнитного момента ЭДК  $\mathbf{M}$ , направленного вдоль  $z$ . Движение этих потоков можно описать уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{en_0}{c} [\mathbf{v}_h, \mathbf{H}_0] + \mathbf{F}_h &= 0, \\ -\frac{en_0}{c} [\mathbf{v}_e, \mathbf{H}_0] + \mathbf{F}_e &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{v}_h, \mathbf{v}_e$  — скорости потоков,  $\mathbf{F}_h, \mathbf{F}_e$  — силы трения дырок и электронов, соответственно. Считая, что в ЭДК преобладает электрон-дырочное рассеяние, а взаимодействие с кристаллической решеткой несущественно, можно положить

$$\mathbf{F}_h = -\mathbf{F}_e = -[\mathbf{r}, \vec{\omega}_h - \vec{\omega}_e] \frac{m_h n_0}{\tau_h} \quad (4)$$

Здесь  $\vec{\omega}_h$  и  $\vec{\omega}_e$  — угловые скорости вращения дырочной и электронной подсистем,  $m_h$  и  $m_e$  — эффективные массы,  $\tau_h$  и  $\tau_e$  — времена релаксации импульса дырок и электронов. Из (3) и (4) следует, что

$$\vec{\omega}_h - \vec{\omega}_e = \frac{1}{3r_0} \frac{eH_0}{c} \frac{r}{m}; \quad \frac{m}{r} = \frac{m_e}{r_e} = \frac{m_h}{r_h} \quad (5)$$

Магнитный момент ЭДК, созданный суммарным круговым током электронов и дырок равен

$$\mathbf{M} = \frac{en_0 R^2}{5c} (\omega_h - \omega_e) \mathbf{V} = \frac{n_0 e^2 H_0 R^2}{15c^2} \frac{r}{m} \frac{V}{r_0}, \quad (6)$$

где  $R$  — радиус капли,  $V = \frac{4}{3} \pi R^3$  — ее объем.

Если, помимо постоянного, на ЭДК воздействует слабое переменное магнитное поле  $H \cos \omega t$ , перпендикулярное  $\mathbf{H}_0$ , то магнитный момент ЭДК  $\mathbf{M}$  будет периодически отклоняться от направления  $\mathbf{H}_0$  на угол  $\theta$ . Уравнение колебаний ЭДК можно записать в виде

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{l}{\tau_L} \frac{d\theta}{dt} + MH_0 \theta = MH' \cos \omega t. \quad (7)$$

Здесь  $I = \frac{2}{5} (m_e + m_h) n_0 R^2 V$  — момент инерции капли. Коэффициент затухания  $\lambda = 1/2\tau_L$  может оказаться весьма малым, если электронная и дырочная подсистемы колеблются как единое целое, и затухание определяется взаимодействием с кристаллической решеткой. Это предположение кажется правдоподобным, так как вследствие конечной сжимаемости электрон-дырочной жидкости магнитное поле  $H_0$  должно

вызвать некоторое возрастание концентрации носителей заряда в ЭДК от полюсов к экватору. Поэтому независимое смещение электронной и дырочной подсистем должно привести к появлению пространственного заряда и возникновению электростатических сил, препятствующих такому смещению. Вводя обозначения  $\omega_0^2 = MH_0/l$  и  $\epsilon = (\omega_0^2 - \omega^2)/2\omega$  получаем из (7) мощность, поглощаемую ЭДК:

$$W(\omega) = \left( \frac{M^2 H^2}{4l} \right) \left[ \frac{\lambda}{(\epsilon^2 + \lambda^2)} \right], \quad (8)$$

что в условиях резонанса ( $\omega = \omega_0$ ) дает

$$W(\omega_0) = \frac{M^2 \tau_L}{2l} H^2. \quad (9)$$

Для оценки величины ожидаемых эффектов воспользуемся некоторыми параметрами ЭДК, типичными для германия [1], положив  $m_e \approx 1 \cdot 10^{-28}$  г,  $m_h \approx 3 \cdot 10^{-28}$  г,  $R \approx 10^{-3}$  см,  $n_0 \approx 2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $\tau_0 \approx 2 \cdot 10^{-5}$  сек. Величину времени релаксации импульса для вырожденно-го электрон-дырочного газа  $\tau$  можно оценить из [2], которая при 2К оказывается порядка  $3 \cdot 10^{-10}$  сек. Характерное время решеточного рассеяния ЭДК  $\tau_L \approx 10^{-8}$  сек получено в [3].

Сравним рекомбинационную восприимчивость ЭДК  $\chi_p = (1/V)(\partial M / \partial H_0)$  с восприимчивостью вырожденного электронного газа. Парамагнитная восприимчивость Паули дается соотношением [4]  $\chi_{\Pi} = n_0 \beta^2 / \phi$ , где  $\beta \approx 10^{-20}$  эрг/гс — магнетон Бора,  $\phi \approx 3$  мэв — энергия Ферми в ЭДК [1]. Подставляя характерные параметры в (6), получаем  $\chi_p / \chi_{\Pi} \approx 50$ . По-видимому, рекомбинационная восприимчивость может превышать и диамагнитную восприимчивость вырожденной плазмы.

Частота резонансного поглощения

$$\omega_0 = \frac{eH_0}{c [2m(m_e + m_h)]^{1/2}} \sqrt{\frac{\tau}{3\tau_0}}. \quad (10)$$

Из (10) видно, что резонансное поглощение должно наблюдаться либо в области более низких частот, либо в области более сильных магнитных полей, чем циклотронное поглощение, поскольку  $\tau \ll \tau_0$ . Так, при  $\omega_0 \approx 6 \cdot 10^8$  сек<sup>-1</sup> резонанс должен наступать при  $H_0 \approx 6 \cdot 10^3$  э. Поскольку затухание при этом должно определяться решеточным временем релаксации  $\tau_L$ , что соответствует  $\omega_0 \tau_L \gg 1$ , резонанс должен быть достаточно четким. Можно надеяться, что экспериментальное исследование резонансного поглощения ЭДК позволит определить как  $\tau_L$  по ширине резонансного пика, так и характерное время электрон-дырочного рассеяния внутри капель по положению резонансного пика.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
10 февраля 1975 г.

## Литература

- [1] Ya. Pokrovskii. *Phys. Stat. Sol.*, 11a, 385, 1972.
- [2] В.С.Багаев, Т.И.Галкина, О.В.Гоголин, Л.В.Келдыш. Письма в ЖЭТФ, 10, 309, 1969.
- [3] W.G. Baber. *Proc. Roy. Soc.*, 158A, 383, 1937.
- [4] С.В.Вонсовский. Магнетизм, М., изд. Наука, 1971.
-