

О ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В.В.Владимиров, А.Ф.Волков

В последнее время проявляется повышенный интерес к возбуждению микроволновых колебаний в плазме твердых тел [1, 2]. Небезинтересно рассмотреть в этой связи возможность возбуждения циклотронной неустойчивости в плазме твердого тела током. Известно, что в газоразрядной плазме можно возбудить ионно-циклотронную неустойчивость таким образом [3] и эти результаты можно перенести на случай плазмы твердого тела.

Дисперсионное уравнение, описывающее циклотронную неустойчивость в плазме твердого тела, имеет вид [3]: I)

$$\sum_i \alpha_i e^{-\beta_i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(\beta_i) [1 + i\sqrt{\pi}(\bar{z}_{ni} + nh_i) W(\bar{z}_{ni})] = 0, \quad (I)$$

где $\beta_i = (k_{\perp} \rho_i)^2$, $\rho_i = \frac{v_i}{\omega_{ci}}$, $\omega_{ci} = \frac{eH}{m_i c}$, $\bar{z}_{ni} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\omega - k_{\parallel} u_i - n \omega_{ci}}{k_{\parallel} v_i}$,

$$h_i = \frac{\omega_{ci}}{k_{\parallel} v_i}, \quad \alpha_i = \frac{\omega_{pi}^2 m_i}{\epsilon_0 k^2 T_i}, \quad \omega_{pi}^2 = \frac{4\pi n_i e^2}{m_i}.$$

u_i - токовые скорости, v_i - тепловые скорости, i - суммирование по сортам частиц, $I_n(\beta_i)$ - функция Бесселя от мнимого аргумента, $W(\bar{z}_{ni})$ - функция Крампа.

Плазма может состоять как из носителей разноименного знака (электроны и дырки), так и из носителей одного знака с различными эффективными массами ²⁾. В дальнейшем мы рассмотрим двухкомпонентную плазму. Все величины, относящиеся к легкой компоненте, мы

будем обозначать буквой "а", к тяжелой - "b" и будем считать, что $s_0 \ll 1$. Поскольку нас интересует возбуждение циклотронной неустойчивости на первой гармонике $\omega \approx \omega_{cb}$, то в сумме по n удержим нулевой и первый члены. Исследование дисперсионного уравнения (I) проведем в приближении:

$$|z_{0a}| \ll 1, |z_{1a}| \gg 1, |z_{0b}| \gg 1, |z_{1b}| \gg 1 \quad (v_b \ll \omega/k_{||} \ll v_a). \quad (2)$$

В этом приближении дисперсионное уравнение (I) принимает вид:

$$\omega - \omega_{cb} = \omega_{cb} \frac{\alpha_b}{\alpha_a} e^{-s_b} I_1(s_b) \left[1 + i \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{-\omega_{cb} + k_{||} u_a}{k_{||} v_a} \right) \right]. \quad (3)$$

Величина $I_1(s_b) e^{-s_b}$ достигает максимума величины при $s_b \approx 1,5$ и равна 0,2. Критерий возбуждения циклотронной неустойчивости имеет вид

$$u_a > \frac{\omega_{cb}}{k_{||}}. \quad (4)$$

Исходя из (2) и (3), имеем $k_{||} \lesssim 0,2(\alpha_b/\alpha_a)(\omega_{cb}/v_b)$ и критерий (4) принимает вид:

$$u_a > 5(\alpha_a/\alpha_b) v_b. \quad (5)$$

Из условия применимости использованных приближений (учитывался резонанс только на основной гармонике!) получим $\alpha_a/\alpha_b > 0,2$, поэтому наиболее мягкий критерий на токовую скорость легкой компоненты, при которой возбуждается неустойчивость на циклотронной частоте тяжелой, имеет вид:

$$u_a > v_b. \quad (6)$$

Инкремент неустойчивости

$$\gamma \sim 0,3 \omega_{cb} \frac{u_a}{v_a} \frac{\alpha_b}{\alpha_a}. \quad (7)$$

Поскольку $\alpha_a/\alpha_b \sim (n_a/n_b)(T_b/T_a)$, то наиболее мягкий критерий соответствует случаю $n_b > n_a$ и $T_a > T_b$.

Проведем численную оценку возможности возбуждения дырочной циклотронной неустойчивости для случая антимонида индия (электронно-дырочная плазма). При $T = 78^\circ\text{K}$, $v_e \sim 2 \cdot 10^8$ ед. $\text{C} \cdot \text{G} \cdot \text{C} \cdot \text{e}$, $v_e/v_h \sim 20$ [5] (v_e, v_h - подвижности). Условие $\omega_{ch} \tau_h > 1$ выполняется при $H > 3 \cdot 10^3$ э, причем соблюдается условие "классичности" задачи $\hbar \omega_{ce, h} < T$. Эффективные массы носителей $m_e = 1,3 \cdot 10^{-2} m_0$, $m_h = 1,8 \cdot 10^{-1} m_0$. В случае $n_e = n_h$ (собствен-

ный полупроводник) и $T_e = T_h$ критерий (5) имеет вид:

$$u_e > 5 v_h. \quad (8)$$

Этот критерий выполняется для рассматриваемого примера при $E \approx \geq 150$ в/см.

Не исключено, что микроволновое излучение, наблюдавшееся Ларраби [2] из $InSb$ при выполнении вышеназванных условий, обусловлено дырочной циклотронной неустойчивостью ($f \approx 4 \cdot 10^{10}$ сек⁻¹).

В легированных полупроводниках ($n_e < n_h$) дырочная циклотронная неустойчивость может возбуждаться и при меньших полях (для $p-InSb$ $E_{мин}$ может быть ~ 30 в/см).

Авторы благодарят Б.Б.Кадошцева и Д.А.Франк-Каменецкого за обсуждение работы.

Московский физико-технический
институт

Поступило в редакцию
10 мая 1966 г.

Литература

- [1] J.Gunn. IBM J.Res. Devel., **8**, 141, 1964.
- [2] R.D.Larrabee. Bull. Amer. Phys. Soc., **9**, 258, 1964.
- [3] W.E.Drummond, M.M.Rosenbluth. Phys. Fluids, **5**, 1507, 1962.
- [4] К.Хилсум, А.Роуз-Инс. Полупроводники типа $A_{III}B_{V}$. Изд. иностр. лит., М., 1963.
- [5] M.Glicksman. Phys.Rev., **124**, 1655, 1961.

1) Это уравнение выведено для косых электростатических волн $\exp(-i\omega t + i\vec{k}\vec{r})$ ($\beta \equiv 4\pi nT/H^2 \ll 1$, $\omega/k \ll c$) в приближении $\alpha_i \gg 1$, $\omega_{ci}\tau_i \gg 1$, где τ_i - время релаксации по импульсам, и $\hbar\omega_{ci} \ll T$.

2) Подразумевается случай многодолинной зонной структуры [4].