

ИОНИЗАЦИОННАЯ САМОКАНАЛИЗАЦИЯ ВИСТЛЕРОВ В ПЛАЗМЕ

И.А.Вдовиченко, Г.А.Марков, В.А.Миронов, А.М.Сергеев

Обнаружен эффект самоканализации вистлеров в плазме, связанный с дополнительной ионизацией газа полем электромагнитной волны.

Взаимная локализация ВЧ поля и плазмы представляет собой заманчивую возможность для решения задач направленной передачи электромагнитной энергии заряженным частицам, создания нелинейных излучателей и волноводных систем и т. д. Подобные задачи возникают при исследовании разнообразных физических проблем – от получения термоядерной плазмы до активного воздействия на ионосферу Земли. В данной работе сообщается об экспериментальном обнаружении эффекта самоканализации вистлеров, который обусловлен дополнительной ионизацией плазмы ВЧ полем электромагнитной волны.

Эксперименты были выполнены в разрядной камере длиной 150 см и диаметром 20 см, в которой с помощью двухтактного генератора ($W_{\Phi} = 360$ Вт, $\omega_{\Phi} = 10^8$ с⁻¹) возбуждалась квазиоднородная фоновая плазма с концентрацией электронов $N_{\Phi} \gtrsim 2 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Давление рабочего газа (воздуха) составляло $p = (6 - 7) \cdot 10^{-3}$ торр, длина свободного пробега электронов $l_e \approx 4$ см. Величина продольного магнитного поля $H = 160$ Э соответствовала условию $\omega_{p\Phi} = (4\pi N_{\Phi} e^2 / m)^{1/2} > \omega_H = eH / mc$. Наблюдение велось за полем ВЧ антенны типа спиральной катушки (диаметр 6 см), расположенной соосно с разрядной камерой и подключенной к выходу генератора ГСТ-2 ($W_0 \lesssim 25$ Вт, $\omega_0 = 10^9$ с⁻¹).

При малых уровнях подводимой к антенне мощности ($W_0 \lesssim 0,1$ Вт) в фоновой плазме наблюдается хорошо выраженный резонансный конус¹, угол раскрытия которого (2θ) оп-

ределяется соотношением: $\text{tg} \theta \approx \omega_0 / \omega_H$. Вне резонансного конуса распределение ВЧ потенциала быстро убывает при удалении от источника.

При увеличении мощности ($W_0 \gtrsim 5$ Вт) пространственные распределения концентрации плазмы (N) и ВЧ поля существенно меняются. В разрядной камере образуется узкий плазменный шнур, который пронизывает всю установку в продольном направлении. На рис. 1 показаны радиальные зависимости $N(r)$, снятые по ионному току насыщения на подвижный ленгмюровский зонд для двух расстояний z от источника при $W_0 = 10$ Вт.

Прямые измерения разности фаз колебаний вдоль плазменного шнура показывают, что в направлении магнитного поля распространяется волна с длиной $\lambda_{\parallel} \approx 20$ см, несколько возрастающей по мере удаления от антенны. Наблюдаемое замедление волны $n_{\parallel} \approx 10$ совпадает с замедлением продольного вистлера в плазме с плотностью $N \approx 7 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$, что близко к значению плотности электронов в шнуре. На рис. 2 представлены радиальные распределения z -компоненты ВЧ электрического поля в условиях, аналогичных рис. 1. Из результатов измерений следует, что формирование волноводной структуры происходит на расстоянии $z = 2 \div 3$ от источника за счет "высвечивания" мелкомасштабных возмущений поля, связанных с плазменными волнами. Обратим внимание на то, что фазы колебаний распространяющегося по шнуру поля E_z сдвинуты в боковых максимумах на π относительно колебаний на оси. Это обстоятельство свидетельствует о вихревом характере захватываемого в волновод поля и существенно отличает описываемую картину от исследованной ранее самоканализации косых ленгмюровских волн².

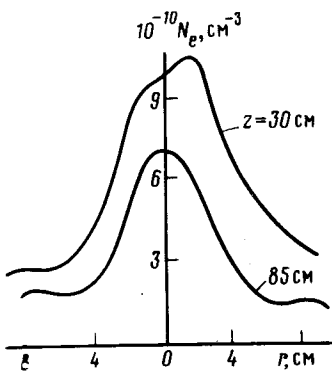


Рис. 1

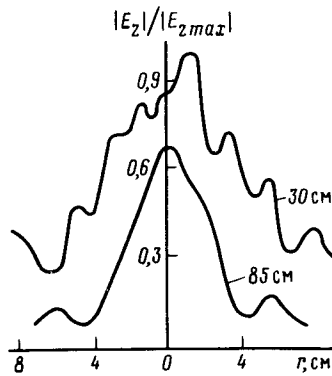


Рис. 2

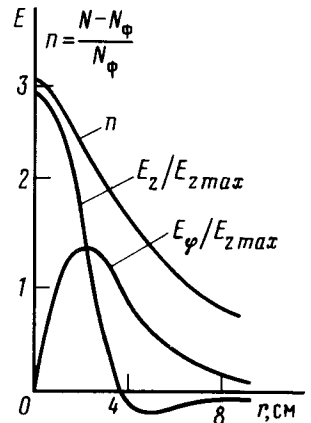


Рис. 3

Переходя к интерпретации эксперимента, отметим, что дополнительная ионизация газа в разряде определяется действием ближнего и волнового полей антенны. В режиме малой мощности источника излучение вистлера отсутствует и превышение концентрации плазмы над фоновой целиком обусловлено нагревом электронов в потенциальном ВЧ поле, сосредоточенном в области $z \leq \lambda_{\parallel \phi} = 2\pi c(\omega_H/\omega_0 - 1)^{1/2}/\omega_{p\phi}$ вблизи антенны. При этом характерный продольный масштаб убывания (в e раз) концентрации составляет $L_{\parallel} \approx 50$ см. При возбуждении шнура плотность плазмы вдоль его оси меняется более плавно, изменяясь на длине 50 см на 20 ÷ 30%. Это позволяет предположить, что дополнительная ионизация газа в области шнура определяется, в основном, полем электромагнитной волны, распространяющейся от ВЧ источника.

Для построения самосогласованной пространственной структуры волнового поля¹⁾ в разряде рассмотрим модель однородного по z радиально симметричного плазменного шнура, вдоль которого бежит вистлер с электрическим полем $E = \frac{1}{2} (\mathcal{E}(r) \exp(i\omega_0 t - ihz) + \text{к.с.})$.

¹⁾ Задача о структуре поля вистлера конечной амплитуды рассматривалась впервые в квазиоптическом приближении в работе³.

Пренебрегая возбуждением плазменных волн, нетрудно найти связь продольной \mathcal{E}_z и радиальной \mathcal{E}_r компонент, ответственных за ионизацию газа, с азимутальной проекцией амплитуды \mathcal{E}_φ :

$$\mathcal{E}_z = -\frac{1}{\sqrt{u}hv_r} \frac{d}{dr} (rv\mathcal{E}_\varphi), \quad \mathcal{E}_r = \frac{hu \frac{d\mathcal{E}_\varphi}{dr} + \sqrt{uv}\mathcal{E}_\varphi k_0^2}{h^2u - 2k_0^2v}. \quad (1)$$

Здесь $k_0 = \omega_0/c$, $u = \omega_H^2/\omega_0^2$, $v = \omega_p^2/\omega_0^2 = \omega_{p\phi}^2/\omega_0^2(1+n)$, где $n = \frac{N-N_\phi}{N_\phi}$. Предположим для простоты, что распределение концентрации плазмы $N(r)$, "размазанное" благодаря поперечной диффузии заряженных частиц, шире радиальной структуры волнового поля. Тогда после очевидной модификации выражений (1) можно получить следующее уравнение для азимутальной компоненты

$$\frac{a^2\mathcal{E}_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathcal{E}_\varphi}{dr} - \frac{\mathcal{E}_\varphi}{r^2} - \frac{\mathcal{E}_\varphi}{u} \frac{h^2u - 2k_0^2h^2uv - k_0^4v^2u}{h^2u - 2k_0^2v} = 0. \quad (2)$$

Соотношение (2) должно использоваться совместно с диффузионным уравнением для концентрации электронов, баланс которых обеспечивается действием ионизации и прилипания. Записывая частоту ионизации молекул воздуха электронным ударом в виде модельной функции $\nu_i = \alpha(|\mathcal{E}_z|^2 + \frac{1}{u}|\mathcal{E}_r|^2)$, получим

$$D_\perp \left(\frac{d^2n}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dn}{dr} \right) - \nu_a n + \alpha(1+n)(|\mathcal{E}_z|^2 + \frac{1}{u}|\mathcal{E}_r|^2) = 0, \quad (3)$$

где коэффициент поперечной диффузии D_\perp и частота прилипания электронов ν_a считаются не зависящими от амплитуды ВЧ поля. Локализованные распределения $\mathcal{E}_\varphi(r)$, $\mathcal{E}_z(r)$, $n(r)$, найденные с помощью численного интегрирования системы (2) – (3), показаны на рис. 3. Очевидное качественное совпадение результатов, включая "тонкий" эффект изменения знака продольной компоненты амплитуды на периферии канала, позволяет сделать вывод о том, что в эксперименте наблюдается ионизационная самоканализация вистлера. Подчеркнем, что в отличие от известных результатов^{4,5} по самофокусировке вистлеров, сопровождающейся разрежением плазмы, обнаруженное в данной работе явление обусловлено увеличением концентрации электронов в сильном ВЧ поле. В этом отношении оно качественно напоминает самовоздействие электромагнитных волн при нагреве полупроводниковой плазмы⁶.

Обращение в бесконечность поперечного показателя преломления волны в уравнении (2) при $N = N^* = h^2uc^2m/8\pi e^2$ соответствует утечке энергии вистлера в плазменные волны⁷. Если, как и в нашем случае, максимальная плотность шнура $N < N^*$, коэффициент возбуж-

дения коротковолновых возмущений достаточно мал: $T \sim \exp\left(-\frac{\pi\omega_p L_\perp}{c} \left[\frac{\omega_H(\omega_H - 2\omega)}{\omega(\omega_H - \omega)}\right]^{1/2}\right) \ll$

$\ll 1$ (L_\perp – поперечный размер шнура). Оценка показывает, что соответствующий декремент пространственного убывания амплитуды вистлера в продольном направлении составляет при этом $10^{-3} + 10^{-5} \text{ см}^{-1}$. Уменьшение амплитуды поля за счет взаимодействия с плазменными волнами должно приводить к снижению концентрации заряженных частиц и увеличению длины электромагнитной волны λ_\parallel . Можно предположить, что этот эффект дает вклад в наблюдаемое возрастание λ_\parallel по длине установки. Однако более существенной причиной продольной неоднородности шнура остается влияние на концентрацию плазмы ближнего поля источника.

Таким образом, совокупность изложенных данных позволяет утверждать, что в эксперименте обнаружен эффект самоканализации вистлера, связанный с нагревом электронов в поле волны. Увеличение температуры приводит к дополнительной ионизации газа и образованию плазменного шнура, который захватывает и направляет создающее его излучение.

Литература

1. Fisher R.K., Gold R.W. Phys. Rev. Lett., 1969, 22, 1093.
2. Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 672.
3. Литвак А.Г. ЖЭТФ, 1969, 57, 629.
4. Stenzel R.L. Phys. Fluids, 1976, 19, 857.
5. Balmashnov A.A. Phys. Lett., 1980, 79A, 402.
6. Янкаускас З.К. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 189.
7. Карпман В.И., Кауфман П.Н. ЖЭТФ, 1982, 83, 149.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
24 июня 1986 г.
