

$$E_1 E_2 \exp[-ik_3 z - k_3^2 v_{Te}^2 (t-t_0)^2 / 2] \quad (4)$$

периодичен в пространстве и имеет гауссову форму во времени с характерной полушириной  $\Delta t, \sim 1/k_3 v_{Te}$ . Для длин волн  $\lambda_3$ , существенно превышающих дебаевский радиус электронов, этот источник порождает всплеск электрич. поля вида (4) и медленно затухающую ленгмюровскую волну.

С увеличением амплитуд внеш. источников вследствие конкуренции двух эффектов — роста амплитуды источника эхового сигнала (2) и дефокусирующего влияния нелинейности — эховый сигнал вначале также возрастает, достигает насыщения, а затем убывает при дальнейшем увеличении амплитуд внеш. источников.

**Влияние внешнего магнитного поля.** При наложении на плазму внеш. магн. поля появляются дополнит. эффекты: 1) доминирующую роль в возникновении Э. п. может играть циклотронное поглощение волн; 2) Э. п. может возникнуть не только на резонансной, но и на суммарной частотах внеш. источников; 3) амплитуда эхового сигнала может существенно зависеть от величины внеш. магн. поля; 4) неоднородность распределённых внеш. источников в направлении поперёк магн. поля может качественно изменить картину формирования эха.

**Э. п. в слаботурбулентной бесстолкновительной плазме** может возбуждаться на модах непрерывного спектра в отклике слабой турбулентности на внеш. воздействие. Возбуждение Э. п. в турбулентной плазме происходит в осн. аналогично изложенному выше. Напр., в случае пространств. Э. п. 2-го порядка первый источник, расположенный в точке  $z=0$ , возбуждает на частоте  $\Omega_1$  ионно-звуковую волну и порождает возмущение спектральной плотности плазмонов  $N_k^1$  вида

$$N_k^1 = g(k) \exp(-i\Omega_1 t + i\Omega_1 z/v_{gz}). \quad (5)$$

Здесь  $v_{gz}$  — групповая скорость плазмонов. Вследствие резонансного затухания ионно-звуковых волн в газе плазмонов с декрементом  $\gamma_s$  и фазового перемешивания мод непрерывного спектра (5) вносимое первым источником макроскопич. возмущение исчезает на расстояниях порядка  $c_s/\gamma_s$ , где  $c_s$  — скорость звука. Второй источник, расположенный в точке  $z=l \gg c_s/\gamma_s$ , возбуждает в плазме на частоте  $\Omega_2$  ионно-звуковую волну и возмущение типа (5) и, кроме того, модулируя моды непрерывного спектра от первого источника, порождает на разностной частоте  $\Omega_3 = \Omega_2 - \Omega_1$  нелинейное возмущение спектральной плотности плазмонов, являющееся источником эхового сигнала. В точке эха  $z_3 = \Omega_2 l / \Omega_3$  моды непрерывного спектра становятся когерентными, поэтому суммирование по  $k$  приводит к возникновению в окрестности точки  $z_3$  макроскопич. возмущения концентрации плазмы  $\delta n_3$ . Пространств. форма эхового сигнала несимметрична: слева от точки эха профиль амплитуды  $\delta n_3$  описывается ф-цией  $\exp(\xi)$ , а справа — ф-цией  $\xi \exp(-\xi)$ , где  $\xi = \gamma_3 (z - z_3) / c_s$ .

Диффузия плазмонов, разрушая фазовую память системы, приводит к экспоненц. ослаблению эхового сигнала.

#### Эхо плазменное в неоднородной плазме

**Гидродинамическое Э. п.** (специфический вид эха) возникает в холодной бесстолкновительной плазме с размытой границей, представляющей собой неоднородный узкий переходный слой, толщина к-рого  $l$  мала по сравнению с поперечной длиной волны  $\lambda_\perp = 2\pi/k_\perp$  поверхностных колебаний. Вследствие размытости границы плазмы поверхностные волны испытывают бесстолкновительное затухание, обусловленное перекачкой их энергии в продольные ленгмюровские колебания, декремент к-рого  $\gamma_s$  пропорционален толщине переходного слоя. В холодной бесстолкновительной плазме ленгмюровские колебания являются незатухающими. Поскольку в каждой плоскости  $x = \text{const}$  ленгмюровские колебания происходят со своей локальной частотой  $\omega_{pe}(x)$ , волновой вектор с течением времени возрастает, а макроскопич. возмущения, напр.

поверхностный заряд переходного слоя, исчезают вследствие бесстолкновительного затухания поверхностных волн и фазового перемешивания ленгмюровских колебаний. В простейшем случае нелинейной гидродинамич. Э. п. возникает след. образом. Два коротких сторонних импульса вида  $E_{ct} = E_{1,2}(t) \exp(ik_{1,2}y)$  воздействуют на плазму переходного слоя в моменты времени  $t=0$  и  $t=\tau$ , порождая нелинейные возмущения с поперечными волновыми векторами  $k_\perp = k_{2,1} \pm k_1$ . Фазовая фокусировка этих микрокопич. возмущений в момент времени  $t=2\tau$  приводит к возбуждению эхового сигнала в виде макроскопич. поверхностного заряда переходного слоя. Для  $t < 2\tau$  амплитуда Э. п. нарастает пропорционально  $\exp[\gamma_1(t-2\tau)]$ , затем эховый сигнал затухает по закону  $\exp[\gamma_2(k_\perp)(2\tau-t)]$ .

Аналогичным образом возникает Э. п. на локальном альвенсовском резонансе в переходном слое магнитоактивной плазмы.

**Линейное Э. п. в неоднородной плазме.** Дополнит. качеств. эффекты возникновения Э. п. в неоднородной плазме связаны с изменением условий распространения волн и линейным механизмом фазовой фокусировки мод непрерывного спектра. В слабонеоднородной изотропной плазме (напр., благодаря фазовой фокусировке мод непрерывного спектра неоднородностью) возможно возникновение Э. п. на суммарной частоте внеш. источников во 2-м порядке по их амплитудам; возможно линейное Э. п. на ленгмюровских и необыкновенных волнах. При малых амплитудах наиб. практич. интерес представляет линейное Э. п., к-рое проявляется в виде нелокального отражения ленгмюровских волн в слабонеоднородной изотропной плазме, регенерации необыкновенной волны в плазме, находящейся в неоднородном внеш. магн. поле, нелокального прохождения поперечных эл.-магн. волн через непрозрачный слой изотропной слабонеоднородной плазмы, *баллистической трансформации волн*. В каждом из указанных случаев механизмы возникновения Э. п. несколько различаются. Напр., регенерация необыкновенной волны в плазме, находящейся в неоднородном магн. поле, обусловлена обращением фазового перемешивания модулированных микропотоков резонансных частиц при прохождении ими областей циклотронного резонанса. Механизм его возникновения состоит в следующем. Необыкновенная волна с частотой  $\omega$  и волновым вектором  $k_\parallel$  распространяется в бесстолкновительной плазме вдоль слабонеоднородного внеш. магн. поля, пространств. профиль напряжённости к-рого имеет вид горба. В результате циклотронного поглощения волна затухает на резонансных частицах с продольными скоростями  $v_\parallel = \Omega/k_\parallel$  (где  $\Omega = \omega - \omega_{v_e}$  и  $\omega_{v_e}$  — гирочастота плазменных электронов), порождая при этом моды непрерывного спектра, к-рые проникают через непрозрачные для исходной волны слои плазмы на противоположную сторону горба. Поскольку частота  $\Omega$  в пределах горба меняет свой знак, процесс фазового перемешивания может быть обращён. При одноврем. выполнении условий фазовой фокусировки и циклотронного резонанса волна на противоположной стороне горба регенерируется. Эффективность регенерации  $T = \kappa_\perp^2 |L_R/k_\parallel|$ , где  $L_R$  — длина неоднородности  $L_R$  определяется условием  $d(k_\parallel - \Omega/v_\parallel)/dz = k_\parallel/L_R$ , а  $\kappa_\perp$  — декремент циклотронного затухания необыкновенной волны.

*Лит.*: Кадомцев Б. Б., Затухание Ландау и эхо в плазме, «УФН», 1968, т. 95, с. 111; Водяницкий А. А., Ерохин Н. С., Моисеев С. С., О влиянии кинетических эффектов на распространение волн в неоднородной плазме, «ЖЭТФ», 1971, т. 61, с. 629; Алиев Ю. М., Ревенчук С. М., Гидродинамическая теория эха в сильнонеоднородной плазме, «ЖЭТФ», 1986, т. 90, с. 913; Павленко В. Н., Ситенко А. Г., Эховые явления в плазме и плазмонных средах, М., 1988. *Н. С. Ерохин, В. Л. Красовский.*

**ЭХОЛОТ** — навигационный прибор для определения глубины водоёмов с помощью акустич. эхо-сигналов. Действие Э. основано на измерении промежутка времени  $t$ , прошедшего от момента отправки зондирующего звукового импульса до момента приёма отражённого от дна эхо-сигнала. Глубина водоёма  $h = ct/2$ , где  $c$  — скорость звука в воде. В качестве зондирующей послылки в Э. используются акустич. импульсы длительностью от долей до десятков