

или фазовая фокусировка). Т. о., в ЛБВ возникает индуцированное излучение Черенкова — Вавилова и эл.-магн. волна при её распространении вдоль замедляющей системы усиливается, причём фазовая скорость волны $v_{\text{фз}}$ в системе с электронным потоком оказывается меньше фазовой скорости волны в системе без потока.

Фазовая группировка в ЛБВ типа О получается при нек-ром превышении нач. скорости электронов v_e над фазовой скоростью волны $v_{\text{фз}}$. В системе координат, связанной с волной, электроны, первоначально равномерно расположенные в тормозящем и ускоряющем продольном поле волны, захватываются ею и постепенно смещаются под действием поля к точке $E_z=0$ (рис. 2). Относит. скорость смещения тормозящихся электронов

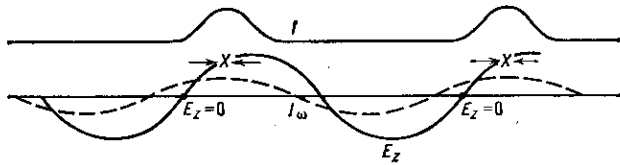


Рис. 2. Распределение продольного электрического поля замедленной волны E_z , конвекционного тока I и его основной гармоники I_{ω} при усилении сигнала в ЛБВ типа О; x — центр сгущения электронов.

меньше, чем ускоряющихся, поэтому сгущение электронов происходит в тормозящей фазе поля и энергия в среднем передаётся от электронов полю. Если же $v_e = v_{\text{фз}}$, то сгущение образуется симметрично около точки $E_z=0$ и обмен энергией между пучком и полем в среднем отсутствует: конвекционный ток частоты ω , образованный в пучке под действием поля, сдвинут по фазе на $\pi/2$ по отношению к полю.

В ЛБВ типа М фазовая группировка получается в результате дрейфа электронов в скрещенных электрич. и магн. полях (см. *Дрейф заряженных частиц*). Поперечное электрич. поле замедленной волны приводит к продольному дрейфу и образованию сгустков около нулевых точек этого поля, где продольное электрич. поле волны имеет макс. значение и тормозит электроны. В результате сгустки отдают свою потенц. энергию волне и одновременно дрейфуют к замедляющей системе (рис. 1, б); т. о., кинетич. энергия электронов меняется мало, а усиление волны происходит за счёт изменения потенциальной энергии электронов в статич. электрич. поле.

Электронные волны в ЛБВ типа О. Модуляция электронного потока эл.-магн. волной и, в свою очередь, возбуждение этой волны электронами приводит к образованию электронно-эл.-магн. волн, наз. иногда также электронными волнами. Их комплексные волновые числа $k = k' + ik''$ определяются в линейной теории ЛБВ, справедливой при достаточно малой мощности усиливаемого сигнала, когда возмущения плотности и скорости электронов пучка малы по сравнению с их постоянными составляющими. Совместное решение ур-ний Максвелла и линеаризованных ур-ний движения электронов приводит к кубич. ур-нию для k , три корня к-рого соответствуют трём электронным волнам. При синхронизме электронного пучка и замедленной волны амплитуда одной из этих волн нарастает вдоль лампы: её постоянная нарастания k'' определяет усиление сигнала на ед. длины в ЛБВ $G = 8,69k''$ (в дБ), а постоянная распространения k' — фазовую скорость $v_{\text{фз}} = \omega/k'$. Усиление существует в нек-рой области относит. изменения скоростей v_e и $v_{\text{ф}}$ — в т. н. зоне усиления (рис. 3).

Величина и положение зоны усиления существенно зависят от параметров, определяющих свойства ЛБВ, — параметра усиления ϵ (обозначаемого также C) и параметра пространственного заряда $\sigma^2 = (\omega_q/\epsilon\omega)^2$ (обозначаемого также $4QC$), где ω_q — плазменная частота с учётом поперечных размеров пучка и влияния замедля-

ющей системы. Параметр усиления характеризует взаимное влияние, связь электронного потока и поля замедленной волны: $\epsilon = (I_e K_{\text{св}}/4U_e)^{1/3}$, где I_e — ток пучка, U_e — ускоряющее напряжение, $K_{\text{св}}$ — сопротивление связи замедляющей системы, определяемое продольным электрич. полем волны, действующим на электроны. В типичных ЛБВ $\epsilon = 0,05 - 0,15$; с ростом ϵ усиление возрастает, зона усиления расширяется.

Параметр пространственного заряда σ^2 — пропорциональный плотности заряда в пучке, характеризует влияние кулоновских сил расталкивания электронов, препятствующих образованию сгустков и тем самым, как правило, уменьшающих величину усиления (рис. 3). Силы расталкивания электронов и величина параметра пространственного заряда существенно зависят от соотношения длины замедленной волны, поперечных размеров электронного пучка и пространства взаимодействия замедляющей системы: в тонких пучках силы расталкивания малы, а в нек-рых случаях даже способствуют группированию электронов, приводя к увеличению усиления. Усиление ЛБВ уменьшается также под действием др. факторов: потерь в замедляющей системе, разброса скоростей v_e , неидеальности группировки и т. д. Роль этих факторов возрастает с увеличением частоты сигнала, особенно при переходе в миллиметровый диапазон волн.

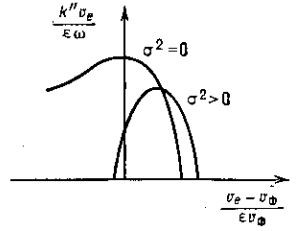


Рис. 3. Зоны усиления ЛБВ типа О при различных параметрах пространственного заряда.

Фазовая скорость нарастающей электронной волны $v_{\text{фз}}$ отличается от скорости замедленной эл.-магн. волны $v_{\text{ф}}$ и во всей зоне усиления оказывается меньше скорости электронов v_e ; это обеспечивает правильную фазовую группировку образующихся сгустков электронов в тормозящей фазе поля и передачу энергии от электронного потока полю. Вне зоны усиления синхронизм электронов и эл.-магн. волны существенно нарушается, взаимодействие между ними становится слабым и три электронные волны превращаются в одну эл.-магн. волну замедляющей системы и две волны пространственного заряда электронного потока.

Нелинейные явления в ЛБВ типа О. Увеличение амплитуды усиливаемой волны при её распространении вдоль замедляющей системы приводит к значит. возмущениям в движении электронов, сильной модуляции электронного пучка, в результате чего возникает ряд нелинейных явлений: уменьшение ср. скорости электронов; обгон одних электронов другими, деформация сгустков и движение относительно поля синхронной волны; появление высших гармоник конвекционного тока и поля пространственного заряда на частотах 2ω , 3ω , . . ., возбуждение поля замедленной эл.-магн. волны на этих гармониках; расслоение электронного пучка в результате неравномерной модуляции пучка по сечению, вызванной неравномерным распределением напряжённости поля замедленной волны и поля пространственного заряда по сечению; остановка и поворот электронов; поперечные движения электронов под действием СВЧ-полей замедляющей системы и поля пространственного заряда. Наиб. важные первые три явления, принципиально связанные с механизмом группировки и существенные уже при умеренных мощностях и небольших кпд. При усилении на нач. участке лампы электроны сгущаются в тормозящей фазе поля (рис. 2). Дальнейшая эволюция пучка определяется отставанием сгустка от волны и нелинейностью модуляции, приводящей к распаду сгустка. Если различие нач. скорости электронов v_e и фазовой скорости волны $v_{\text{ф}}$ невелико и соответствует центру зоны усиления (рис. 3), то образуется сгусток из электронов с примерно одинако-