

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ

В.И. Канавец¹, Ю.Д. Мозговой², Н.В. Стахмич², И.Н. Тисов², С.А. Хриткин²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова;

²Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)
e-mail: lmis@miem.edu.ru

The particularities of the interaction beams of charge particle for realization creating the amplifiers and generators of microwaves for study and diagnostics of the active ambiances are researched. Interaction between beams of charge particle is considered in round waveguide. The schemes to realization of the microwaves amplifiers on sonar beams, as well as schemes generator of microwaves on direct and inverse bunch electron are offered. The dispersion features at interaction between plasma waves are analyzed.

Исследуется взаимодействие двух попутных или попутного и встречного потоков заряженных частиц в гладком или периодическом волноводе. Исследование проводится в рамках гидродинамической модели в приближении слабого сигнала. В каждом из пучков распространяются быстрые и медленные волны пространственного заряда. В зависимости от величины плазменной частоты и значений коэффициента редукции меняются значения фазовых скоростей и соотношения между фазовой и групповой скоростью волн. При выполнении условий синхронизма устанавливается связь между волнами, в том числе обратная связь, характерная для режима ЛОВ.

Будем предполагать, что на входе и выходе системы нет отражений полей, и колебания в системе определяются распределенной обратной связью. Исследование соотношения между усилением и генерацией в согласованных системах важно для понимания процессов в мощных источниках микроволнового излучения на пространственно развитых электродинамических системах [1-3].

В приближении слабого сигнала разделяют четыре вида парной связи волн - аперидическая и периодическая связи волн без усиления и аперидическая и периодическая связи волн с медленной волной потока с усилением (режимы усиления ЛБВ и ЛОВ). Продольные распределения полей в связанной системе зависят от граничных условий на входе и выходе электродинамической структуры. В общем случае получаем многоволновую задачу о связанных колебаниях и волнах.

При условиях согласования и синхронизма с медленной волной пучка основную роль играет возрастающая по координате собственная волна связанной системы или возрастающее во времени колебание в цепи обратной связи. В системе есть характерная длина, соответствующая переходу от волновых к колебательным процессам, обусловленным внутренней обратной связью. По мере увеличения обратной связи становится важным развитие

процессов во времени, описываемое с помощью зависимостей комплексной частоты от волнового числа.

В общем случае колебательный режим в связанной системе определяется внутренней обратной связью волн, отражениями полей от входа и выхода, и обратной связью в пространственно развитых системах, позволяющих выделить эквивалентное кольцо обратной связи.

В случае пространственно развитых электродинамических структур связь в виде эквивалентного замкнутого кольца реализуется путем возбуждения поперечных мод электромагнитного поля. Учет эквивалентного кольца внешней обратной связи позволяет исследовать соотношение процессов абсолютной и конвективной неустойчивостей в потоках заряженных частиц.

В связанной системе имеются цепи внутренней и внешней обратной связи. В цепи эквивалентного кольца ставится условие замыкания полей. В системе возбуждаются моды колебаний номера n , где номер моды равен числу стоячих волн, которые укладываются по длине кольца. Самая низшая мода колебаний относится к режиму постоянной амплитуды поля вдоль кольца с учетом изменения амплитуды поля низшей моды во времени.

Рассматриваются соотношения между внутренней обратной связью волн и колебаниями в кольцевой системе. Первоначально рассматривается случай слабой двухволновой связи волн потоков. Это периодические и аperiodические связи волн с малым или большим усилением. В рассматриваемых системах условия замыкания полей в кольце легко выполняются. Если перейти к анализу процессов во времени, то при слабом усилении на длине системы L периодическая картина процесса усиления по координате сохраняется, а амплитуда поля медленно возрастает во времени, не нарушая при этом периодическую картину по координате.

Таким образом, получаются действительные волновые числа по координате (нет усиления - нет конвективной неустойчивости) и комплексные значения частоты – возникает возрастание полей во времени (существует абсолютная неустойчивость). Характерным примером является случай возбуждения низшей моды колебаний с неизменной амплитудой поля вдоль координаты. В данном случае нет комплексной постоянной распространения, а частота комплексная - мнимая часть частоты не равна нулю.

В случае значительного усиления на заданной длине системы следует учитывать дополнительные процессы, обеспечивающие усиление полей в отсутствии генерации. В электронике следует вводить распределенное затухание и учитывать отражения и рассеяния полей на входе и выходе.

В качестве примера рассмотрим режим усиления ЛБВ в системе двух попутных электронных потоков в круглом гладком волноводе, рис. 1. Из рис. 1а видно, что условия синхронизма выполняются для быстрой волны более медленного электронного потока и медленной волны более быстрого пучка. Рассматривается случай трехволновой связи волн, соответствующий аperiodической связи волн с усилением и периодической перекачке мощности. Полученные дисперсионные характеристики замедления от длины волны на рис. 1а соответствуют зависимостям комплексной частоты от волнового числа,

приведенным на рис. 1б. Дисперсионные зависимости на рис. 1б согласно правилам Стэррока, соответствуют конвективной неустойчивости двухпучкового взаимодействия потоков заряженных частиц [4-5].

В ЛБВ на входе и выходе используются согласующие устройства и вводятся распределенные потери. Если потери в цепи обратной связи достаточно большие, то генерации нет. В одномодовых ЛБВ режим усиления достигается при больших омических потерях. В сверхразмерных СВЧ устройствах используются распределенные потери на многомодовое излучение.

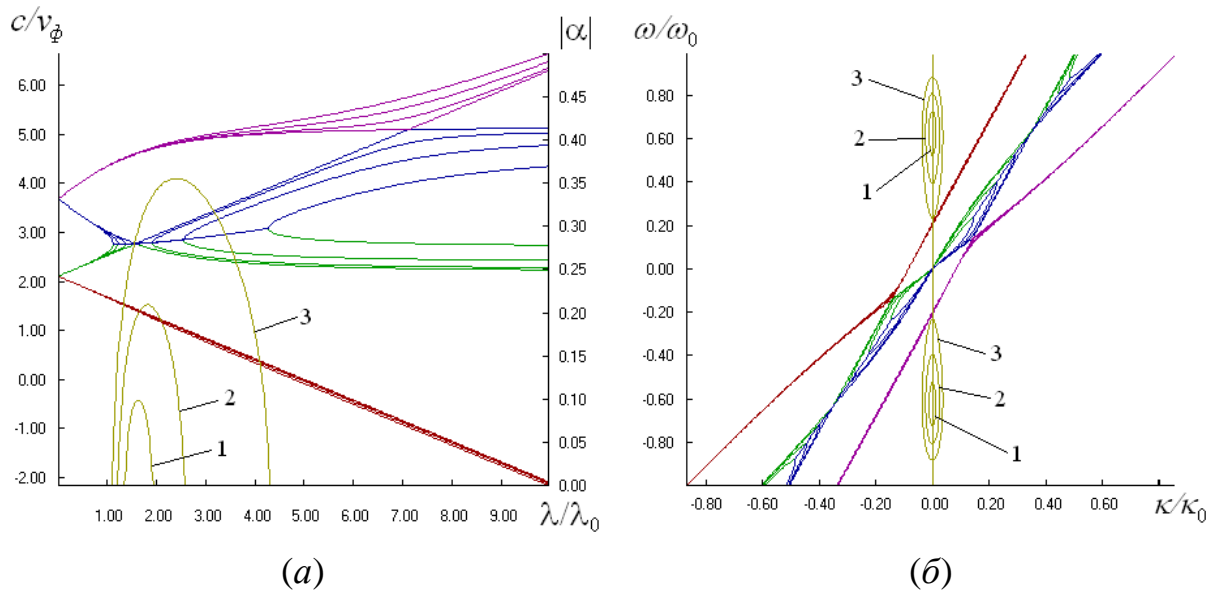


Рис. 1. Дисперсионные зависимости взаимодействия узкого и широкого попутных электронных потоков ($U_{01} = 20$ кВ, $R_1 = 0.5$, $U_{02} = 70$ кВ; $\alpha_{p1,2} = 0.2$) в координатах: а) $c/v_\phi = f(\lambda/\lambda_0)$; б) $\omega/\omega_0 = f(k/k_0)$ при изменении коэффициента взаимодействия пучков: $M_{12} = M_{21} = 1$. - 0.25, 2. - 0.5, 3. - 0.75

В общем случае, следует рассматривать взаимодействие попутных и встречных пучков заряженных частиц одного или разного знаков. Пучки могут быть широкие или узкие. Взаимодействие быстрых волн этих потоков соответствует направленному ответвителю с периодической или аперидической связью волн. Попутный поток рассматривается с ограниченным расхождением медленных и быстрых волн. При слабой связи широких потоков заряженных частиц возникает двухволновая связь волн, а при связи узкого попутного и широкого встречного пучков реализуется трехволновая связь, рис. 2.

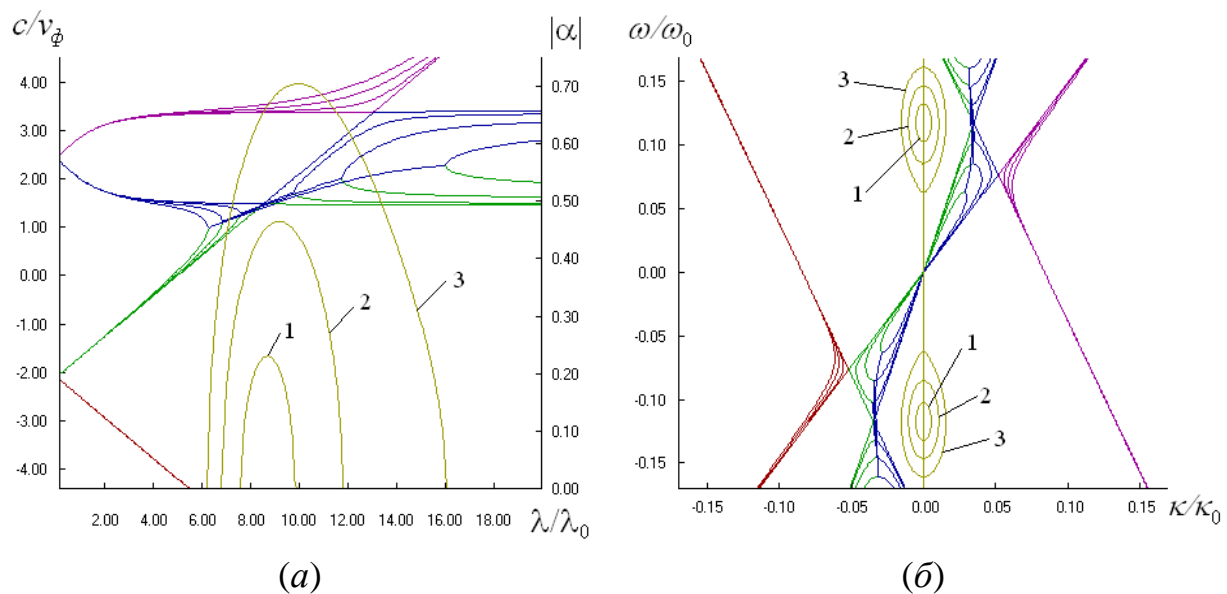


Рис. 2. Дисперсионные зависимости взаимодействия узкого попутного и широкого встречного электронных потоков ($U_{01} = 50$ кВ, $R_1 = 0.5$, $U_{02} = 70$ кВ; $\omega_{\phi 1,2} = 0.2$) в координатах: а) $c/v_\phi = f(\lambda/\lambda_0)$; б) $\omega/\omega_0 = f(\kappa/\kappa_0)$ при изменении коэффициента взаимодействия пучков: 1. - 0.25, 2. - 0.5, 3. - 0.75

Из рис. 2а следует, что при взаимодействии быстрых волн попутного и встречного электронных потоков реализуется режим направленного ответвителя с апериодической перекачкой мощности без усиления. Синхронизм медленной волны попутного потока и быстрой волны встречного пучка приводит к периодической перекачке мощности, соответствующей режиму взаимодействия типа ЛОВ.

На дисперсионных характеристиках получается область расталкивания кривых (действительные решения в системе координат - замедление от длины волны). Так как осуществляется периодическая связь волн пучков заряженных частиц – связь медленной волны попутного потока с быстрой волной встречного потока, то это соответствует режиму периодической связи волн с усилением – режиму ЛОВ.

На рис. 2б приведены дисперсионные зависимости комплексной частоты от волнового числа. В соответствии с правилами Стэррока полученные дисперсионные характеристики соответствуют абсолютной двухпучковой неустойчивости попутного и встречного потоков заряженных частиц [4-5].

Рассматривается переход от комплексного волнового числа к комплексной частоте для сверхразмерных электродинамических систем. Из-за влияния распределенных потерь эти системы характеризуются малым усилением. Для перехода к комплексной частоте выделяется участок длиной L (длина меньше периода пульсаций) и этот участок замыкается в эквивалентное кольцо. В этом случае слабое усиление по координате на малом участке можно связать с усилением во времени.

Пусть некоторый наблюдатель проходит малый отрезок пути. На этом отрезке сигнал увеличивается на малое значение амплитуды. Когда наблюдатель проходит вдоль системы по кольцу и оказывается на входе

системы – амплитуда поля увеличивается во времени на малую величину dA . Таким образом, получается усиление во времени dA/dt вместо усиления по координате - dA/dz . Такой процесс связи режимов ЛОВ и абсолютной неустойчивости реализуется при длине области взаимодействия, существенно меньшей пусковой длины начала генерации ЛОВ. При выборе длин ЛОВ, близких к пусковым, основную роль играет цепь внутренней обратной связи. Система переходит в режим ЛОВ – генератора на внутренней обратной связи. Роль внешней обратной связи становится не существенной.

1. С.П.Бугаев, В.И.Канавец, В.И.Кошелев, В.А.Черепенин. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы. Н. Наука. 1991г.
2. В.И.Канавец, Ю.Д.Мозговой, А.И.Слепков. Излучение мощных электронных потоков в резонансных замедляющих системах. М. МГУ. 1993г.
3. В.И.Канавец, Ю.Д.Мозговой, С.А.Хриткин. О возможности создания многолучевых усилителей и генераторов микроволн на электронных и позитронных потоках. Труды XI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн». МГУ. 21-26 мая. Звенигород. 2007.
4. А.И.Ахиезер и др. Электродинамика плазмы. М. Наука. 1974 .
5. А.Ф.Александров, А.А.Рухадзе. Лекции по электродинамике плазмopodobных сред (неравновесные среды). М. МГУ. 2002 г.