

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Анализ интерференционного режима работы ЭВЛ на основе
приближенной нелинейной теории**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 421 группы
направления 03.03.03 Радиофизика
Факультета Нелинейных Процессов
Юдина Сергея Петровича

Научный руководитель
ассистент кафедры электроники,
колебаний и волн

_____ Титов А.В.

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн
профессор, д.ф.-м.н.

чл.-корр. РАН

_____ Д.И. Трубецков

Саратов 2016 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	2
Введение.....	3
1. Гидродинамическое описание электронного потока.....	5
2. Теория волн пространственного заряда малой амплитуды.....	6
2.1 Волны пространственного заряда малой амплитуды.....	6
3. Двухлучевая неустойчивость.....	7
4. Интерференционный режим ЭВЛ.....	8
4.1 Интерференционное усиление.....	8
5. Приближенная нелинейная теория ЭВЛ.....	10
6. Заключение.....	12
7. Список использованных источников.....	13

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мощные источники микроволнового излучения являются неотъемлемой частью арсенала средств современной науки и техники. Они находят применение в системах связи, радиолокации, радиоастрономии, медицине, а также интенсивно используются в ряде физических направлений управляемом термоядерном синтезе, возбуждении химических и газовых лазеров, взаимодействии электронных потоков с газом и плазмой. Основными проблемами мощной электроники являются повышение уровня выходной мощности, рабочей частоты и длительности импульса, а также повышение эффективности работы в широком частотном диапазоне. Для достижения высоких уровней перечисленных параметров наибольшее распространение получили электронные приборы, основанные на длительном продольном взаимодействии потока электронов с резонансной замедляющей структурой. Примерами таких устройств являются многорезонаторные пролетные клистроны и лампы бегущей волны (ЛБВ) на резонансных замедляющих системах. Расширение полосы усиления этих приборов до 10% и выше стало особенно важно в последние годы в связи с необходимостью решения задач, связанных с передачей информации и решением энергетических проблем. Эффективность преобразования доступной электрической энергии в мощное микроволновое излучение зависит от качества формирования электронных потоков и условий их взаимодействия с электромагнитными полями волноведущих систем приборов. Значительные успехи, достигнутые в области микроволновой электроники средней и большой мощности, являются следствием теоретических и экспериментальных исследований, проводимых на протяжении многих лет. Этим достижениям, в частности, способствовали использование метода крупных частиц, электродинамического описания взаимодействия на основе разделения вихревых и кулоновских полей, анализа явлений в устройствах при больших электронных нагрузках, работающих в середине и у границ полосы прозрачности электродинамической системы. Созданы методы моделирования задач электроники, электростатики и магнитостатики, электродинамики. Созданы узлы и системы, позволяющие получать комплекс выходных параметров приборов, работающих при воздействии различных внешних дестабилизирующих факторов.

Экспериментальные успехи в создании приборов во многом определяются тщательностью их теоретической проработки. Волновые и колебательные процессы в резонансных замедляющих системах мощных

электронных приборов требуют сложного математического описания. Физические процессы, протекающие при работе мощных приборов, недостаточно изучены, свойства и возможности традиционных узлов и систем приборов использованы не полностью. Поэтому актуальными являются задачи разработки и развития математических моделей и методов теоретического исследования, совершенствование алгоритмов и программ расчета физических процессов в электронных приборах.

Экспериментальные исследования с целью создания устройств с более высокими выходными характеристиками (расширенной полосой усиления, повышенными выходной мощностью и КПД) весьма эффективны, но требуют трудоемкого макетирования. Развитие теоретических методов разработки с использованием новых комплексов программ для электродинамических и электронно-оптических систем позволяет создавать и модернизировать СВЧ устройства и электронные системы. Актуальными остаются задачи совершенствования процесса моделирования и проектирования узлов и систем приборов (электронные пушки, электродинамические системы, коллекторы электронов, магнитные системы, вакуумные системы, системы охлаждения), с целью оптимального совмещения функций различных систем в конструкциях приборов. Необходимо также обеспечивать выходные параметры прибора в определенных массогабаритных характеристиках при условии воздействия различных внешних факторов. Актуальными являются задачи совершенствования технологии, применяемой при изготовлении мощных электровакуумных приборов.

1 ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

В первой главе, я рассмотрел возможность использования гидродинамической теории применительно к анализу процессов в электронных потоках связана с переходом от микроскопического описания уравнений дискретной среды к макроскопическим уравнениям непрерывной среды, опирающимся на следующие положения. Поток электронов в вакууме можно рассматривать как дрейфующую плазму. Поведение плазмы характеризуется поведением её микроскопических элементов. О коллективном поведении плазмы можно говорить в длинноволновом приближении, когда рассматриваются волновые процессы с длиной волны, много большей значения дебаевского радиуса.

2 ТЕОРИЯ ВОЛН ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ

2.1 Волны пространственного заряда малой амплитуды

В этой главе пойдет речь о волновых процессах в электронных пучках на сверхвысоких частотах, связанных с силами упругого взаимодействия, которые в первую очередь обусловлены силами объёмного пространственного заряда. Исторически изучение этих вопросов связано с развитием теории СВЧ - приборов с модуляцией электронного потока по скорости и последующей группировки в пространстве дрейфа. Первоначально описание явлений в электронном потоке ограничивалось кинематическим приближением, т.е. движение электрона рассматривалось без учёта полей пространственного заряда только под действием внешних сил. Хотя понятие волны пространственного заряда было введено практически одновременно с изобретением клистрона в работах В.С.Хана и С.Рамо в 1939г., значение электронно-волновой теории выявилось значительно позднее, в 50-х годах, когда была показана возможность нарастания при определённых условиях амплитуд волн пространственного заряда вдоль пространства дрейфа. Дальнейшее развитие этой теории, которое привело к созданию электронно-лучевого усилителя – двухлучевой лампы, принцип которой основывается на усилении волн пространственного заряда. Появился принципиально новый на тот момент подход к рассмотрению явлений в электронном потоке – теория связанных волн и, как следствие, к исследованию электронных приборов, принцип работы которых основан на использовании колебательных и волновых явлений в самих электронных пучках без использования каких-либо «материальных» колебательных систем.

Под волнами пространственного заряда (ВПЗ) будем понимать волнообразное распространение возмущений плотности, тока, напряжённости поля пространственного заряда и скорости в электронном пучке, причём скорость такого возмущения зависит от постоянной составляющей плотности пространственного заряда в потоке.

В основу рассмотрения волновых процессов в электронных потоках положен гидродинамический анализ. Такой подход позволяет с единых позиций рассмотреть широкий класс задач о поведении потоков заряженных частиц как в вакууме, так и твёрдом теле.

3 ДВУХЛУЧЕВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

В третьей главе рассмотрим гидродинамическое описание электронного потока, которое привело нас к необходимости ввести понятие волн пространственного заряда, распространяющихся в потоке заряженных частиц, позволило применительно к рассмотрению системы с предварительной скоростной модуляцией электронного пучка существенно уточнить линейную кинематическую теорию пролётного клистрона. Рассмотрим теперь ситуацию, в которой ВПЗ не просто приведёт к уточнению какой-либо имеющейся теории, а позволит объяснить принцип работы двухлучевой лампы – усилителя, в котором используются два электронных пучка с немного различающимися скоростями, движущихся параллельно друг другу и сильно связанных через общее поле пространственного заряда (см. рис.1).



Рис.1. Схематическое изображение двухлучевого усилителя.

Для улучшения связи между пучками в экспериментах использовались катоды, выполненные в виде плоских спиралей, которые вставлялись друг в друга, в результате потоки оказывались хорошо смешанными. Усиливаемый сигнал вводился путём модуляцией одного или обоих потоков за счёт размещаемого в начале пространства взаимодействия отрезка спирали. Двухлучевой усилитель не состоялся как используемый в СВЧ - электронике прибор, так как с увеличением частоты необходимо уменьшать разность скоростей потоков, а следовательно, при какой-то величины разницы скоростей получим, что с учётом теплового разброса скоростей два пучка просто неразличимы. Вместе с тем двухлучевой усилитель является классическим примером рассмотрения различных неустойчивостей в теории волн.

4 ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЭВЛ

4.1 Интерференционное усиление

Ниже будет показана возможность интерференционного усиления сигнала в системе двух взаимодействующих электронных пучков. Рассмотрим два одномерных электронных потока. Их взаимодействие, согласно линейной теории, можно описать двумя уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_1}{dx^2} + 2j\beta_{e1} \frac{di_1}{dx} - (\beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2) i_1 &= -\beta_{p1}^2 i_2 \\ \frac{d^2 i_2}{dx^2} + 2j\beta_{e2} \frac{di_2}{dx} - (\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2) i_2 &= -\beta_{p2}^2 i_1 \end{aligned}, \quad (4.1)$$

здесь i_1, i_2 – переменные составляющие токов пучков, $\beta_{e1,e2} = \frac{\omega}{v_{01,02}}$,

$\beta_{p1,p2} = \frac{\omega_p}{v_{01,02}}$, ω – частота сигнала, ω_p – плазменная частота, $v_{01,02}$ – скорости пучков.

Из системы (4.1) можно легко получить дисперсионное соотношение, если положить $i_{1,2} \sim e^{-j\beta x}$

$$\frac{\beta_{p1}^2}{(\beta - \beta_{e1})^2} + \frac{\beta_{p2}^2}{(\beta - \beta_{e2})^2} = 1 \quad (4.2)$$

или

$$\frac{\omega_{p1}^2}{(\omega - \beta v_{01})^2} + \frac{\omega_{p2}^2}{(\omega - \beta v_{02})^2} = 1 \quad (4.3)$$

Точное решение дисперсионного уравнения получить затруднительно, поэтому найдем приближенное решение. Для этого введем среднюю скорость v и разброс по скоростям δ

$$v = \frac{v_{01} + v_{02}}{2},$$

$$\delta = \frac{v_{01} - v_{02}}{2},$$

тогда в случае $v_{01} \neq v_{02}$, получим, что $v_{01} = v + \delta$, $v_{02} = v - \delta$.

Пусть теперь $\beta = \frac{\omega}{v} + \gamma$, при этом $\gamma\delta \rightarrow 0$, тогда

$$\omega - \beta v_{01} = \omega - \frac{\omega(v + \delta)}{v} - \gamma(v + \delta) = -\frac{\omega\delta}{v} - \gamma v$$

$$\omega - \beta v_{02} = \frac{\omega\delta}{v} - \gamma v$$

Отсюда следует новая форма дисперсионного уравнения

$$\frac{1}{\left(\frac{\delta\omega}{v\omega_p} + \frac{\gamma v}{\omega_p}\right)^2} + \frac{1}{\left(\frac{\delta\omega}{v\omega_p} - \frac{\gamma v}{\omega_p}\right)^2} = 1 \quad (4.4)$$

После введения замены, дисперсионное соотношение принимает вид

$$\frac{1}{(\chi + \xi)^2} + \frac{1}{(\chi - \xi)^2} = 1, \quad (4.5)$$

здесь $\chi = \frac{\omega\delta}{\omega_p v}$ – параметр неоднородности, $\xi = \frac{\gamma v}{\omega_p}$. Преобразуем уравнение

(4.5) к виду

$$\xi^4 - 2(\chi^2 + 1)\xi^2 - 2\chi^2 + \chi^4 = 0 \quad (4.6)$$

Уравнение (4.6) имеет аналитическое решение вида

$$\xi = \pm\sqrt{(\chi^2 + 1) \pm \sqrt{4\chi^2 + 1}} \quad (4.7)$$

Проанализируем решение (4.7). Видно, что для возникновения неустойчивости в системе из двух пучков, хотя бы один из корней должен иметь мнимую часть. Это условие достигается при $0 < \chi < \sqrt{2}$. В этом случае в пространстве системы будут распространяться четыре волны: одна нарастающая, одна затухающая и две постоянной амплитуды. Как было показано ранее, такая неустойчивость может использоваться для усиления.

5 ПРИБЛИЖЕННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ ЭВЛ

На основе приближенной нелинейной теории произведен расчет коэффициента усиления двухлучевого усилителя. Покажем, что при определенных условиях коэффициент усиления по мощности может достигать 40 дБ.

В этом разделе построена последовательная приближенная нелинейная теория двухпучковой неустойчивости в применении к двухлучевому усилителю.

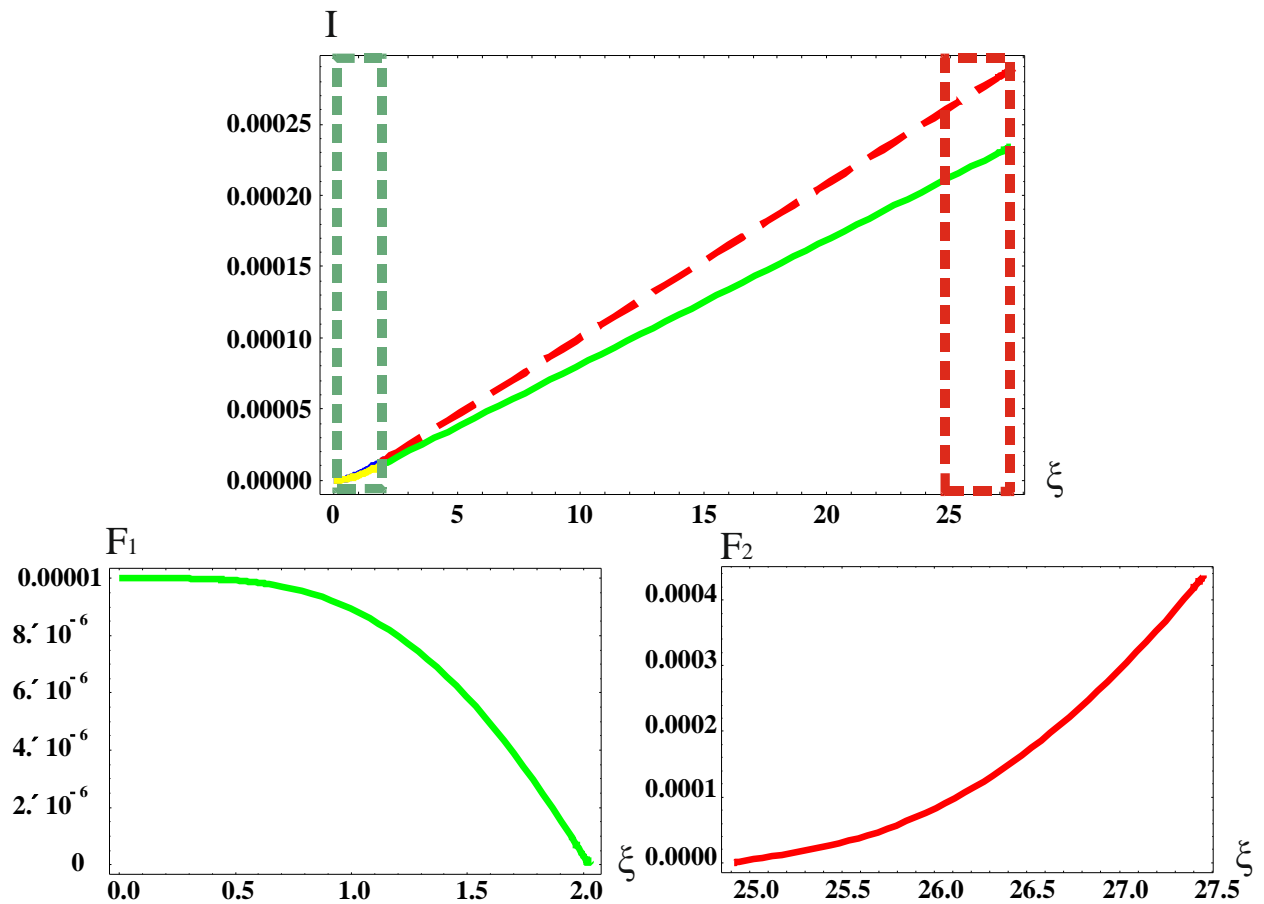


Рисунок.2 Результаты расчета двухлучевого усилителя. (а) Распределение переменной составляющей токов пучков; (б) распределение поля во входной ЗС, (в) распределение поля в выходной ЗС. (1000 ГГц; 532 В; 0.00054м)

Построена приближенная нелинейная теория двухпучковой неустойчивости. Получены выражения, описывающие поведение двух взаимодействующих электронных потоков. На основе теории был проведен расчет коэффициента усиления двухлучевой лампы. Показано, что коэффициент усиления в зависимости от конфигурации лампы может достигать 40 дБ. Также показано, что при модуляции сразу двух пучков существенно ухудшается группировка. При этом существенно снижается коэффициент усиления.

Этого можно избежать, путем применения, к примеру, автоэмиссионных катодов, поскольку в этом случае пучки будут модулироваться по отдельности.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диплома ознакомились с принципами работы ЭВЛ (двухлучевой усилитель). Ознакомился с интерференционным режимом работы ЭВЛ. Ознакомился с приближённой нелинейной теорией двухпоточковой неустойчивости. Провёл анализ работы ЭВЛ в интерференционном режиме на основе приближённой нелинейной теории двухпоточковой неустойчивости. Рассчитал коэффициент усиления в интерференционном режиме. Получены выражения, описывающие поведение двух взаимодействующих электронных потоков. На основе теории был проведен расчет коэффициента усиления двухлучевой лампы

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Р. Бриггс. Двухпучковая неустойчивость. Достижения физики плазмы. т.3 и 4.// Изд-во «Мир»; М.:1974.
2. М.С. Рабинович, Д.И. Трубецков. Введение в теорию колебаний и волн, 2-е изд., перераб. и доп. // М. Наука 1992, 454 с
3. В.М. Лопухин. Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками.// М.: 1953, 324 с.
4. В.Н. Шевчик, Д.И. Трубецков. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. // М.: Сов. Радио, 1970, 584 с.
5. В.А. Солнцев. Нелинейные волны в электронных потоках. // «Известия ВУЗов.», «Радиофизика». 1974, Т. 17, №4 ,
6. Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. Лекции по СВЧ электронике для физиков. Т.1. // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 496с.
7. Л.А. Вайнштейн, В.А Солнцев. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. // М.: Сов. радио, 1973.