

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Анализ интерференционного режима взаимодействия двух
электронных потоков для терагерцового диапазона частот**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4031 группы

направления 03.03.03 – «Радиофизика»

института физики

Степановой Марии Алексеевны

Научный руководитель

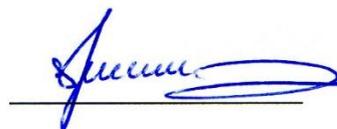
доцент кафедры электроники,
колебаний и волн

 06.06.22

Титов А.В.

Зав. кафедрой электроники,
колебаний и волн

к. ф.-м. н., доцент



Гришин С.В.

Саратов 2022 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Линейная теория систем с двумя взаимодействующими электронными потоками.....	4
1.1 Теория интерференционного режима усиления в системе двух взаимодействующих электронных потоков	4
Глава 2. Линейная теория взаимодействия двух электронных потоков с бегущей электромагнитной волной.....	7
2.1 Основные уравнения и результаты их аналитического решения	7
2.2 Аналитическое решение самосогласованной задачи	10
2.3 Результаты линейной теории взаимодействия двух электронных потоков с бегущей электромагнитной волной в рамках метода дисперсионного уравнения	11
Заключение	13
Список литературы	14

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время физический процесс взаимодействия электромагнитной волны с электронным потоком достаточно хорошо изучен. Существует множество различных приборов, построенных на использовании данного явления, в частности один из самых распространённых, это лампа бегущей волны. ЛБВ широко используется в радиолокации, передачи энергии на большие расстояния, в системах дальней связи. Но, в обилие различных модификаций данного прибора, еще не было описано конструкции ЛБВ использующих два электронных потока для усиления сигнала. Что вызывает большой интерес к исследованию данной темы.

Физические процессы, протекающие при работе некоторых типов мощных приборов, и принципы их работы недостаточно изучены. Поэтому актуальной является разработка и развитие теории таких процессов, и применение ее к конкретным приборам.

Проведение экспериментальных исследований с целью создания устройств с более высокими выходными характеристиками (расширенной полосой усиления, повышенными выходной мощностью и КПД), а также проведение тестовых испытаний в последнее время стало весьма дорогостоящим мероприятием, из-за трудности поддержания на необходимом уровне производственной и экспериментальной базы. Поэтому, для микроволновой электроники остаются актуальными задачи развития теоретических методов проведения разработки приборов, методов анализа электроннооптических и электродинамических систем.

Глава 1. Линейная теория систем с двумя взаимодействующими электронными потоками

Данная глава представляет обзор работы, посвященный явлению двухпучковой неустойчивости в электронике сверхвысоких частот. А также была показана возможность существования режима взаимодействия двух попутных электронных потоков, обеспечивающий вне границ области двухпотоковой неустойчивости усиление входного сигнала за счет интерференции парциальных волн постоянной амплитуды. Классическим примером систем, способных демонстрировать как абсолютную, так и конвективную неустойчивость, стали двухпотоковые системы. В теории динамических систем это явление было названо двухпотоковой или двухпучковой неустойчивостью.

1.1 Теория интерференционного режима усиления в системе двух взаимодействующих электронных потоков

В данном обзоре сделан акцент на взаимодействие двух электронных пучков. Рассматривается система двух бесконечно широких ионно-компенсированных идеально перемешанных электронных потоков в отсутствие теплового разброса, движущихся в одном направлении с незначительно различающимися скоростями в продольном магнитном поле бесконечно большой величины. Линеаризованная исходная система уравнений состояла из двух уравнений движения для пучков, двух уравнений непрерывности и уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial v_{1,2}}{\partial t} + v_{01,02} \frac{\partial v_{1,2}}{\partial x} = \eta E \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \rho_{1,2}}{\partial t} + \rho_{01,02} \frac{\partial v_{1,2}}{\partial x} + v_{01,02} \frac{\partial \rho_{1,2}}{\partial x} = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{\epsilon_0} \quad (1.3)$$

здесь $v_{1,2}$ – переменные высокочастотные составляющие скоростей пучков, $v_{01,02}$ – постоянные составляющие скоростей пучков, $\rho_{1,2}$ – переменные составляющие плотностей пучков, $\rho_{01,02}$ – постоянные составляющие плотностей пучков, E – напряженность продольного высокочастотного электрического поля пространственного заряда, η – удельный заряд электрона, ε_0 – универсальная электрическая постоянная. Индекс «1» относится к первому, а «2» — ко второму потоку.

Далее, путем несложных преобразований, можно получить систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_1}{dx^2} + 2j\beta_{e1} \frac{di_1}{dx} - (\beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2) i_1 &= -\beta_{p1}^2 i_2, \\ \frac{d^2 i_2}{dx^2} + 2j\beta_{e2} \frac{di_2}{dx} - (\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2) i_2 &= -\beta_{p2}^2 i_1, \end{aligned} \quad (1.4)$$

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 возмущенного сигнала, $\omega_{p1,p2}$ -плазменные частоты

пучков, $v_{01,02}$ - невозмущенные скорости пучков.

Рассмотрим вытекающее из неё дисперсионное уравнение:

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

Воспользуемся приближенным решением данного алгебраического уравнения четвертого порядка, после введения замен, предложенным Гаевым [1], следует новая форма дисперсионного уравнения:

$$\frac{1}{(\chi + \xi)^2} + \frac{1}{(\chi - \xi)^2} = 1 \quad (1.5)$$

Уравнение (1.5) имеет аналитическое решение вида:

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

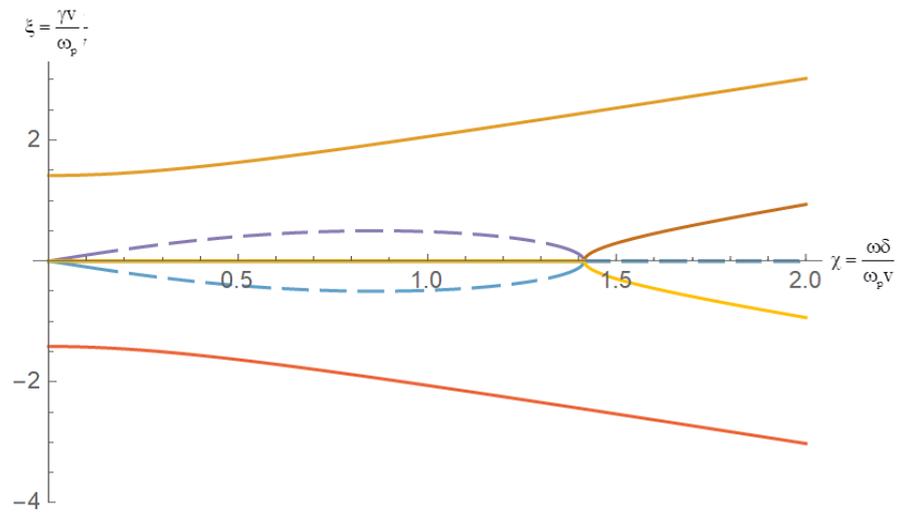


Рисунок 1 – Дисперсионная характеристика двухпотоковой системы [2].

Очевидно, 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.

При увеличении частоты система выйдет из режима неустойчивости и перейдет в так называемый интерференционный режим (при $\chi > \sqrt{2}$). В этом режиме в системе распространяются четыре волны постоянной амплитуды. Однако за счет интерференции этих волн, также можно получить усиление.

Таким образом была показана возможность существования режима взаимодействия двух попутных электронных потоков, обеспечивающий вне границ области двухпотоковой неустойчивости усиление входного сигнала за счет интерференции парциальных волн постоянной амплитуды. Описанный режим представляет интерес для работы в коротковолновой области СВЧ диапазона.

Глава 2. Линейная теория взаимодействия двух электронных потоков с бегущей электромагнитной волной.

В данной главе, в рамках метода дисперсионного уравнения, была рассмотрена последовательная линейная теория ЛБВ с двумя потоками (см. рисунок 2). В рамках построенной теории проводится анализ возможных режимов работы прибора.

Идея использования двух электронных потоков для повышения выходных характеристик лампы бегущей волны возникла практически сразу после открытия явления двухпотоковой неустойчивости.

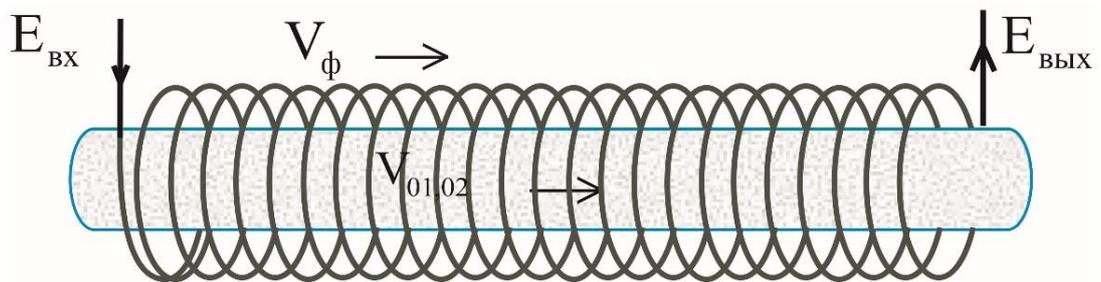


Рисунок 2. Схема ЛБВ с двумя потоками [3].

2.1 Основные уравнения и результаты их аналитического решения

Рассматривалась в одномерном приближении система двух взаимодействующих, идеально перемешанных, бесконечно широких, движущихся в одинаковом направлении электронных потоков, взаимодействующих с продольной компонентой электрического поля бегущей волны в замедляющей структуре. Соответствующая система дифференциальных уравнений в предположении, что все переменные величины изменяются по закону $e^{j\omega t}$, включает в себя уравнения для высокочастотных компонент сгруппированного тока в каждом потоке и одно уравнение возбуждения прямой бегущей волны поля в замедляющей структуре.

$$\begin{cases} \frac{d^2 i_1}{dx^2} + 2j\beta_{e1} \frac{di_1}{dx} - (\beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2) i_1 + \beta_{p1}^2 i_2 = j \frac{\beta_{e1} I_{01}}{2U_{01}} E \\ \frac{d^2 i_2}{dx^2} + 2j\beta_{e2} \frac{di_2}{dx} - (\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2) i_2 + \beta_{p2}^2 i_1 = j \frac{\beta_{e2} I_{02}}{2U_{02}} E \\ \frac{dE}{dx} + j\beta_0 E = -\frac{\beta_0^2 K_0}{2} (i_1 + i_2) \end{cases} \quad (2.1)$$

- здесь $i_{1,2}(x)$ – амплитуды высокочастотных компонент токов, $\beta_{e1,e2} = \omega/v_{01,02}$ – электронные постоянные распространения, ω – частота сигнала, $v_{01,02}$ – невозмущенные скорости электронных потоков, $\beta_{p1,p2} = \omega_{p1,p2}/v_{01,02}$ – плазменные постоянные распространения потоков, $\omega_{p1,p2}$ – плазменные частоты потоков, $I_{01,02}$ – постоянные компоненты токов, $U_{01,02}$ – ускоряющие напряжения потоков, $E(x)$ – амплитуда продольной компоненты электрического поля, β_0 – постоянная распространения волны в замедляющей системе, K_0 – сопротивление связи замедляющей системы.

Из системы (2.1) легко получить дисперсионное уравнение задачи. Для этого предположим, что все переменные величины изменяются по закону $e^{-j\beta x}$. Из условия совместности полученной системы алгебраических уравнений находим:

$$\frac{\beta_{p1}^2}{(\beta - \beta_{e1})^2} + \frac{\beta_{p2}^2}{(\beta - \beta_{e2})^2} = 1 + \frac{\beta_0^2 \beta_{e1} C_{01}^3}{(\beta - \beta_0)(\beta - \beta_{e1})^2} + \frac{\beta_0^2 \beta_{e2} C_{02}^3}{(\beta - \beta_0)(\beta - \beta_{e2})^2} \quad (2.2)$$

- здесь $C_{01,02}^3 = \frac{I_{01,02} K_0}{U_{01,02}}$ – параметры Пирса для каждого пучка.

Далее был проведен анализ возможных режимов работы ЛБВ с двумя электронными пучками, для следующих значений параметров: ток каждого пучка 100 мА, ускоряющие напряжения пучков 1300 В и 4000 В, сопротивление связи замедляющей системы 20 Ом.

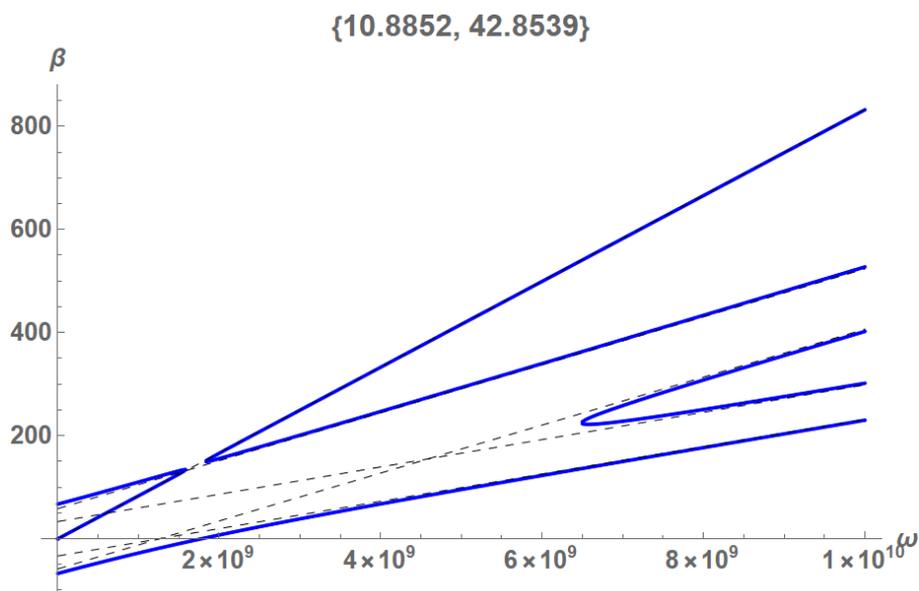


Рисунок 3 – Дисперсионная характеристика для случая взаимодействия двух электронных потоков с бегущей электромагнитной волной в замедляющей системе.

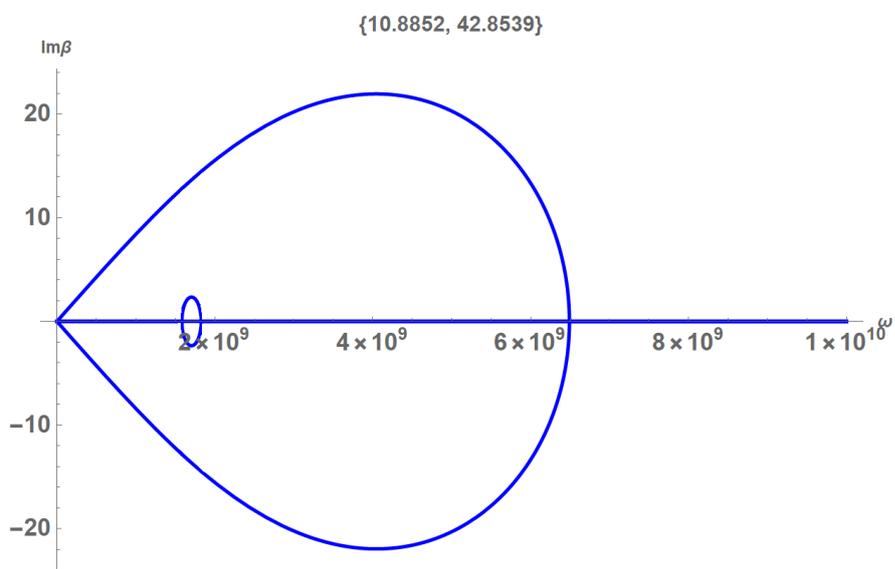


Рисунок 4 – Дисперсионная характеристика для случая взаимодействия двух электронных потоков с бегущей электромагнитной волной в замедляющей системе (мнимая часть решения).

Таким образом, при данных условиях можно выделить следующие режимы работы:

1. двухпотоковая неустойчивость и ЛБВ-неустойчивость;
2. режим двухпотоковой неустойчивости, отсутствие ЛБВ-неустойчивости;

3. отсутствие неустойчивости, интерференционно-крестатронный режим.

2.2 Аналитическое решение самосогласованной задачи

В данной главе было рассмотрено аналитическое решение самосогласованной задачи. Основной задачей в этом случае является нахождение функции распределения амплитуды электрического поля $E(x)$.

Поле представлено в виде суперпозиции пяти парциальных волн следующим образом:

$$E(x) = E_0 \times \sum_{i=1}^5 C_i e^{\gamma_i x} \quad (2.3)$$

здесь γ_i – корни характеристического уравнения, полученного путем приравнивания нулю определителя системы (2.1):

$$\Delta = \begin{vmatrix} p^2 + 2j\beta_{e1}p - (\beta_{e1}^2 - \beta_{p1}^2) & \beta_{p1}^2 & -j\frac{\beta_{e1}I_{01}}{2U_{01}} \\ \beta_{p2}^2 & p^2 + 2j\beta_{e2}p - (\beta_{e2}^2 - \beta_{p2}^2) & -j\frac{\beta_{e2}I_{02}}{2U_{02}} \\ \frac{\beta_0^2 K_0}{2} & \frac{\beta_0^2 K_0}{2} & p + j\beta_0 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.4)$$

Постоянные коэффициенты в (2.6) определяются выражением:

$$C_i = \frac{\gamma_i^4 + D\gamma_i^3 + F\gamma_i^2 + G\gamma_i + K}{\prod_{i=1, i \neq j}^5 (\gamma_i - \gamma_j)} \quad (2.5)$$

Полученные аналитические выражения позволяют получить распределение амплитуды электрического поля вдоль пространства взаимодействия ЛБВ с двумя электронными потоками, а также зависимость коэффициента усиления от длины системы, представленная выражением:

$$G = 20 \text{Log} \frac{E(x)}{E(0)}. \quad (2.6)$$

Полученная аналитическая модель позволяет получить на основе линейного приближения расчет выходных характеристик ЛБВ с двумя электронными потоками, а также проиллюстрировать описанные режимы работы.

2.3 Результаты линейной теории взаимодействия двух электронных потоков с бегущей электромагнитной волной в рамках метода дисперсионного уравнения

В данном разделе был приведен расчет для моделей, ориентированных на более коротковолновую область СВЧ диапазона. При построении диаграмм использовались следующие параметры ускоряющее напряжение первого пучка $U_{01} = 8,5\text{кВ}$, ускоряющее напряжение второго пучка $U_{02} = 10,5\text{кВ}$, токи пучков $I_{01,02} = 100\text{ мА}$, сопротивление связи $R_{св} = 20\text{ Ом}$.

Графики приведены для случаев одного и двух потоков. Ниже приведена серия графиков зависимостей коэффициента усиления от длины пространства взаимодействия при различных значениях частот, соответствующих различным режимам усиления.

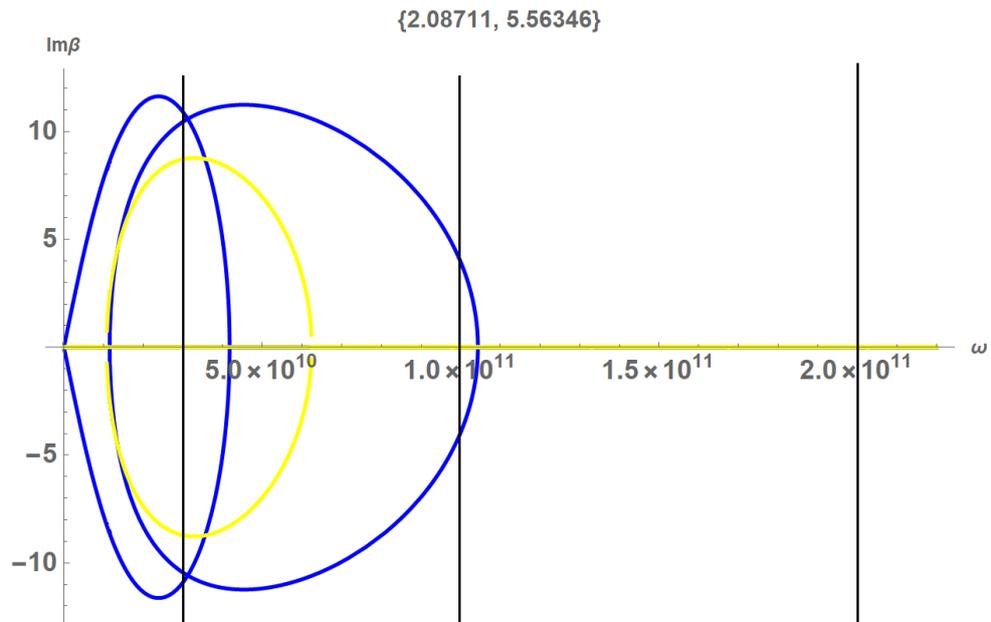


Рисунок 5 – Дисперсионные характеристики для случаев взаимодействия двух электронных потоков с волной и одного потока с волной (с выделенными областями частот).

Ниже на графиках представлены зависимости коэффициентов усиления от длины пространства взаимодействия для значений частот, соответствующих указанным режимам взаимодействия.

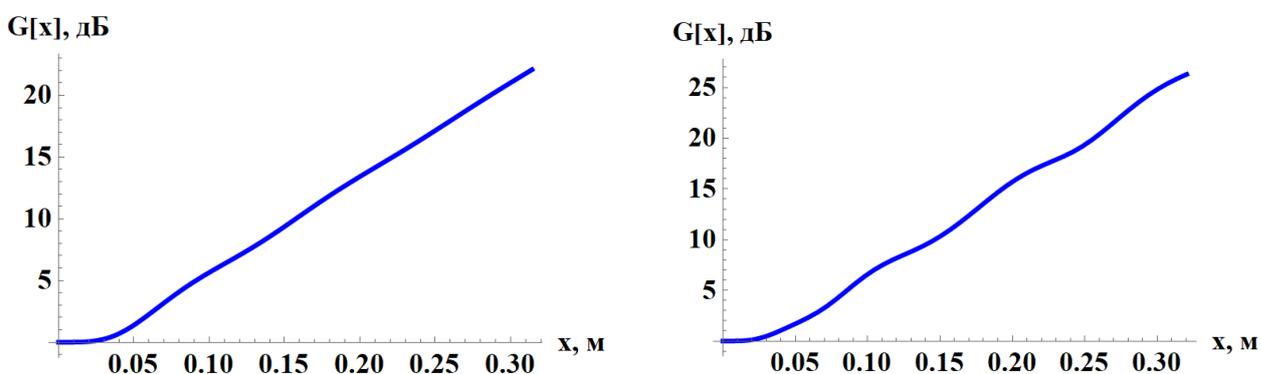


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента усиления от длины системы при частоте $\omega = 3 \cdot 10^{10}$ рад \cdot с $^{-1}$ для однопотоковой системы (слева) и двухпотоковой системы (справа).

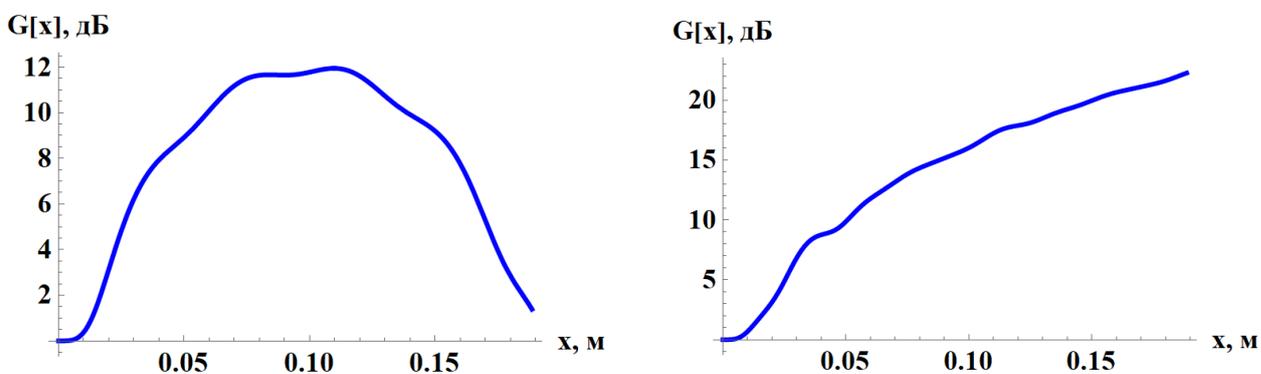


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента усиления от длины системы при частоте $\omega = 1 \cdot 10^{11}$ рад \cdot с $^{-1}$ для однопотоковой системы (слева) и двухпотоковой системы (справа).

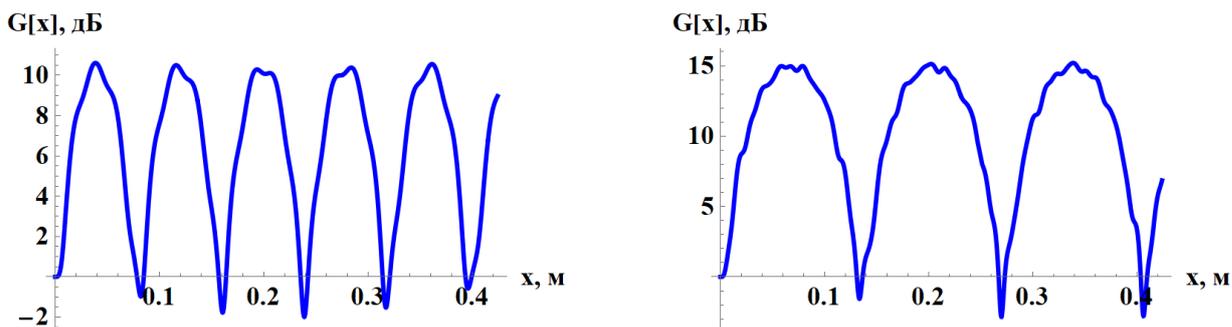


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента усиления от длины системы при частоте $\omega = 2 \cdot 10^{11}$ рад \cdot с $^{-1}$ для однопотоковой системы (слева) и двухпотоковой системы (справа).

Сравнение выходных характеристик показывало, что добавление второго пучка приводит к увеличению области неустойчивости, а также к повышению коэффициента усиления вне области неустойчивости за счет интерференционного взаимодействия.

Заключение

В данной работе было рассмотрено явление двухпотоковой неустойчивости в электронике СВЧ. Предложен новый режим взаимодействия двух попутных электронных потоков, названный интерференционным, обеспечивающий вне границ области двухпотоковой неустойчивости усиление входного сигнала за счет интерференции парциальных волн постоянной амплитуды. Описанный режим представляет интерес для работы в коротковолновой области СВЧ диапазона.

В рамках метода дисперсионного уравнения в линейном приближении проанализированы возможные режимы взаимодействия в модели двух попутных электронных потоков с бегущей электромагнитной волной. Показано, что помимо режима неустойчивости и крестатронного режима также имеет место интерференционно-крестатронный режим усиления.

Сравнение выходных характеристик показывает, что добавление второго пучка приводит к увеличению области неустойчивости, а также к повышению коэффициента усиления вне области неустойчивости за счет интерференционного.

Была решена самосогласованная задача для линейной одномерной модели системы «два попутных электронных потока – бегущая волна» в приближении пяти волн.

Список литературы

-
- 1 - Haeff A. The Electron-Wave Tube – A novel method of Generation and Amplification of Microwave Energy // Proceedings of the IRE. 1949, vol. 37, January, pp. 4–10.
 - 2 - Трубецков Д.И., Титов А.В., Фунтов А.А. Об интерференционном усилении в электронно-волновой лампе (линейная теория) // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 21. С. 86–94.
 - 3 - Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции сверхвысокочастотной электроники для физиков. В 2 т. Т.1. - М.:ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 496 с. - ISBN 5-9221-0372-
 - 4 - Nergaard L.S. Analysis of a simple model of a two-beam growing-wave tube // RCA Review 9, 1948, 585-601.
 - 5 - Титов А.В., Фунтов А.А. Об интерференционном усилении в модели двух взаимодействующих однонаправленных электронных потоков // Сборник трудов участников XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2013»). – Секция 11. Микроэлектроника и электродинамика. Москва, 2013. С. 54–57.
 - 6 - Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ // М.: Сов. Радио, 1970, 584 с.