

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

**«Особенности дискретного взаимодействия двух электронных потоков
между собой и с электродинамическими системами (аналитическая теория,
моделирование и проектирование)»**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 225 группы

направления 03.04.03 Радиофизика

факультета нелинейных процессов

Голованова Никиты Андреевича

Научный руководитель

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

_____ Д.И. Трубецков

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

_____ Д.И. Трубецков

Саратов 2017 год

Введение. Естественный путь развития СВЧ электроники, как и прежде, это исследование новых способов усиления и генерации сигнала, а также продвижение в область всё более высоких частот. В настоящее время идет освоение терагерцового диапазона. При работе на таких высоких частотах у приборов классического типа наблюдается ухудшение ряда характеристик. Это способствует рассмотрению и изучению новых электровакуумных приборов, а также улучшению основных параметров уже существующих. Особое внимание уделяется электронному механизму взаимодействия с различными видами электродинамических структур.

Отдельный интерес проявляется к многолучевым приборам, начиная от многорезонаторных многоканальных клистронов, до многолучевых гибридных ЛБВ, представляющих собой синтез электронно-волновой лампы и лампы с бегущей волной. Одним из способов усиления входного сигнала в подобных приборах является применение механизма двухпоточковой неустойчивости. Такой вид неустойчивости будет развиваться в системе из двух потоков с близкими скоростями, движущихся в одном направлении или в противоположных [1].

В последние годы несколько научных групп в США, Китае и Корее в связи с возросшим интересом к созданию приборов терагерцового диапазона вновь вернулись к исследованию различных вариантов устройств, в которых используется упомянутый выше механизм [2-3]. Исследование одного из таких устройств и проведено в данной работе.

Магистерская работа, главным образом, носит теоретический характер и посвящена рассмотрению механизма двухпоточковой неустойчивости на основе дискретного подхода применительно к варианту двухлучевой ЛБВ. Одним из вариантов такого прибора может служить система, состоящая из двух электронных пучков, разделенных металлическим экраном с отверстиями [4]. Представляется, что подобные системы могут оказаться перспективными в коротковолновой части СВЧ диапазона, что позволяет считать тему магистерской работы актуальной.

Основная цель работы - получение, решение и анализ дисперсионного уравнения для дискретного взаимодействия двух электронных потоков; нахождение коэффициента усиления, а также сравнение построенной теории с теориями непрерывного взаимодействия двух электронных потоков и однолучевой ЛБВ. Помимо теоретической части, в работе уделено внимание моделированию электронной оптики в программе CST studio suite (пакет CST particle studio) [5] и представлен технологический маршрут (этапы изготовления) предлагаемой конструкции прибора [6].

Работа состоит из шести глав. В главе 1 (основные подходы в рассмотрении взаимодействия электронных потоков) приведен краткий обзор некоторых новых и ранних публикаций по данной теме [7-14]. В главе 2 (получение рабочих уравнений) сформулирована постановка задачи и приведен в общем виде вывод рабочих уравнений, описывающих взаимодействие потоков. Глава 3 (взаимодействие электронных потоков) включает решение дисперсионного уравнения, расчет коэффициентов усиления для непрерывного взаимодействия и дискретного, а также их сравнение между собой и с однолучевой ЛБВ. Глава 4 (проектирование и моделирование) посвящена математическому моделированию исследуемой конструкции. Глава 5 (обзор стандартных технологий МСТ) носит обзорный характер стандартных технологий применяемых в микросистемной технике, а в главе 6 (разработка технологического маршрута изготовления на основе LIGA – технологии) на основе LIGA – технологии представлен технологический маршрут изготовления предлагаемой конструкции прибора.

В качестве основных положений выносимых на защиту можно выделить следующие.

Результаты, полученные в главах 3 – 6 получены впервые и носят как фундаментальный, так и практический характер. Двухпоточковая неустойчивость и режим интерференционного усиления, имеющие место при непрерывном и дискретном взаимодействии двух разноскоростных попутных электронных потоков, позволяют создать новые приборы терагерцового

диапазона, о чем свидетельствуют построенная теория, результаты проектирования и моделирования электронной оптики в программе CST и технологический маршрут предлагаемо конструкции прибора.

Вариант устройства, в котором реализуется дискретное взаимодействие, показывает значительный рост коэффициента усиления и увеличение полосы параметра рассинхронизма между средней скоростью потоков и фазовой скоростью невозмущенной волны, в которой есть усиление по сравнению с однолучевой ЛБВ и ЛБВ с двумя непрерывно взаимодействующими потоками.

Основное содержание работы. Известно, что многоскоростной электронный поток при определенных условиях становится неустойчивым по отношению к продольным возмущениям, которые вследствие кулоновского взаимодействия между электронами могут нарастать в пространстве или во времени. Такой тип взаимодействия применяется в двухлучевых усилителях СВЧ, в которых используется эффект нарастания начальной группировки электронов при взаимодействии двух электронных потоков, движущихся в одном направлении с различными скоростями и носит название электронно-волнового. На данный тип взаимодействия существенное влияние оказывает значение разности скоростей электронных потоков, зависящее от плотности тока в каждом из них.

Первая часть данной магистерской работы посвящена теоретическому исследованию механизма двухпотоковой неустойчивости на примере модели состоящей из двух пучков, взаимодействующих между собой и полем замедляющей системы, схема которой представлена на рисунке 1. Рассматривается как непрерывное взаимодействие двух электронных потоков [15], так и дискретное [16], когда между потоками расположен экран с отверстиями. Дискретный характер взаимодействия выражается в том, что в волноводе процессы в потоках потоки представляются бесконечным набором гармоник, а взаимодействие потоков сводится к их непрерывному взаимодействию между собой и полем замедляющей системы.

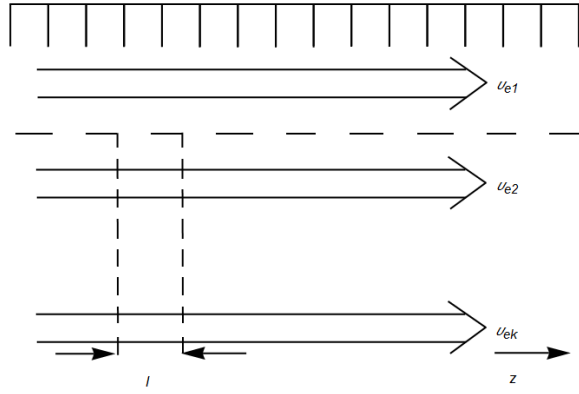


Рисунок 1 – Модель системы и набор k электронных потоков со скоростями

$$v_{e1}, v_{e2}, \dots, v_{ek}.$$

В работе был рассмотрен случай многоскоростного потока, образованного путем смешения k односкоростных электронных потоков со скоростями $v_{e1}, v_{e2}, \dots, v_{ek}$ и получены зависимости в общем виде, а затем осуществлен переход к двум электронным потокам (v_{e1}, v_{e2}). При этом, учитывалось взаимодействие только с одной пространственной гармоникой поля линии замедления (v_0), а переменные величины изменялись по волновому закону $e^{j(\omega t - \beta z)}$, где β - постоянная распространения волны в линии при наличии электронных потоков. Система рабочих уравнений включает в себя уравнение переменной составляющей плотности тока (1) и уравнение возбуждения линии передачи электронным потоком [15], но без учета встречного излучения (2):

$$\frac{\partial^2 \tilde{j}_k}{\partial z^2} + 2j\beta_{ek} \frac{\partial \tilde{j}_k}{\partial z} - \beta_{ek}^2 \tilde{j}_k + \beta_{pk}^2 \sum_k \tilde{j}_k = 2j\beta_{ek} \frac{C_k^3}{SK_k}. \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{E}_z}{\partial z} + j\beta_0 \tilde{E}_z = -\frac{\beta_0^2 SK}{2} (\tilde{j}_1 + \tilde{j}_2). \quad (2)$$

Здесь k – номер потока ($k = 1, 2$), \tilde{E}_z – амплитуда продольной составляющей электрического поля, \tilde{j}_k – переменная составляющая плотности тока, β_{ek} – постоянная волны в k электронном потоке, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, β_{pk} – плазменное волновое число k электронного потока, C_k^3 – параметр усиления Пирса для k электронного потока, S – площадь пучка в области взаимодействия; K_k – сопротивление связи (коэффициент, связывающий ток и возбуждаемое им в плоскости поле; считаем

его одинаковым для всех потоков), β_0 – постоянная распространения волны в отсутствии электронных потоков.

Решение системы уравнений (1) и (2) для полей представляется в виде $\tilde{E}_z = \tilde{E}_z e^{-j\beta z}$, а для токов как бесконечный набор пространственных гармоник $\tilde{j}_1 = \sum_{n=0}^{\infty} \tilde{j}_n e^{-j(\beta + \frac{2\pi n}{l})z}$, $\tilde{j}_2 = \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{j}_m e^{-j(\beta + \frac{2\pi m}{l})z}$, где n, m – это номера пространственных гармоник тока первого и второго потока, l – период системы, учитывающий дискретный характер взаимодействия. В результате, после общепринятой в теории ЛБВ замены переменных [15], получено дисперсионное уравнение (3)

$$(j\delta - b + jd) \left(1 - \frac{\left(\frac{\beta_p}{\beta_e C}\right)^2}{\left((j\delta - h) + \frac{n}{CN_l}\right)^2} - \frac{\left(\frac{\beta_p}{\beta_e C}\right)^2}{\left((j\delta + h) + \frac{m}{CN_l}\right)^2} \right) = \left(\frac{1}{\left((j\delta - h) + \frac{n}{CN_l}\right)^2} + \frac{1}{\left((j\delta + h) + \frac{m}{CN_l}\right)^2} \right). \quad (3)$$

Здесь параметр $h = \frac{1 - \frac{v_{e1}}{v_{e2}}}{c(1 + \frac{v_{e1}}{v_{e2}})}$ характеризует разность скоростей электронных потоков, параметр b – отклонение средней скорости потоков v_e от скорости невозмущенной волны в линии. При $b > 0$ средняя скорость v_e больше фазовой скорости невозмущенной волны v_0 . Параметр $d > 0$ учитывает потери в линии замедления (далее полагается что $d = 0$). Комплексное число $\delta = x + jy$, характеризует постоянную распространения волны в линии с электронным потоком. $CN_l = C \frac{\beta_e l}{2\pi}$ – параметр позволяющий учесть дискретный характер путём задания периода системы l .

В зависимости от значения управляющих параметров, уравнение (3) может применяться как для описания ЛБВ, так и для непрерывного или дискретного взаимодействия двух электронных потоков. Его решение было проведено для случая оптимального электронно-волнового взаимодействия

$\frac{h}{\beta_p} = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 1$, что позволило связать параметры, характеризующие электронный поток ($4QC$ и h) [17].

Дисперсионное уравнение (3) описывает пять взаимодействующих парциальных волн. Одна из них всегда имеет постоянную амплитуду, остальные могут иметь постоянную амплитуду или в определенных интервалах изменения параметров экспоненциально возрастать или затухать. Фазовые скорости двух из этих волн близки к средней скорости электронов первого потока, двух других – к скорости второго. В частном случае равенства скоростей двух потоков ($h = 0$) в системе распространяются три волны со своими фазовыми скоростями: с постоянной, убывающей и возрастающей амплитудой, близкие по скорости к средней скорости v_e потоков, что аналогично теории ЛБВ и подтверждает правильность построенной теории для двух потоков.

Для непрерывного случая взаимодействия электронных потоков ($n = m = 0$) поведение корней уравнения (3) представлено на рисунках 2 а) и б).

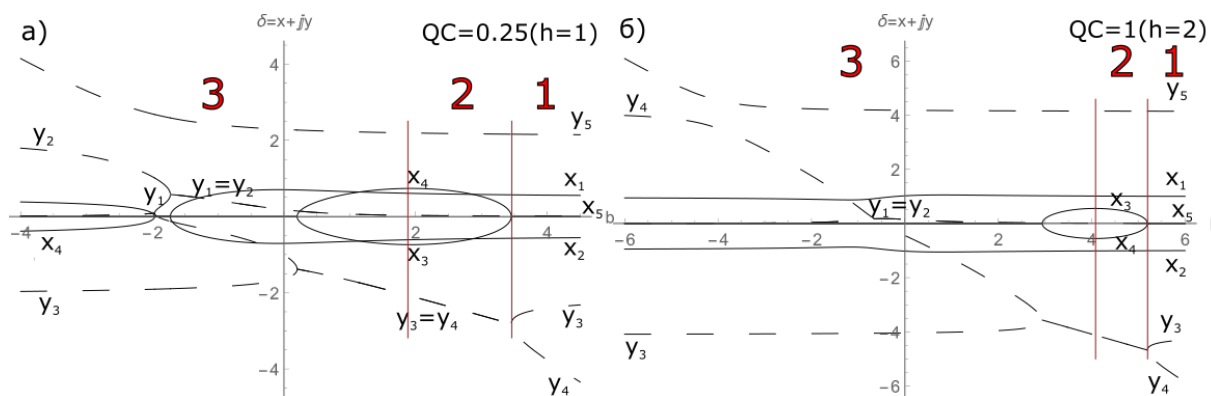


Рисунок 2 а), б) – Зависимость корней $\delta_i = x_i + jy_i$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) дисперсионного уравнения (3) от параметра b . Обозначения: сплошные прямые – действительные части корней (x_i), пунктирные – мнимые (y_i).

В соответствии с представленными рисунками 2 а), б), при больших значениях b (область 1), когда скорости обоих электронных потоков значительно отличаются от скорости волны в линии, постоянные распространения пяти волн близки к тем, которые наблюдаются в отсутствие связи между потоками и полем линии замедления. В данной области

распространяются четыре электронные волны, постоянные распространения которых ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_5$ при $b > 0$ и $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ при $b < 0$) близки к соответствующим постоянным распространения волн в двухлучевой лампе. Амплитуда двух из этих волн не изменяется с расстоянием ($x_3 = x_4 = 0$), амплитуда одной (δ_1) нарастает, а другой (δ_2) убывает. Кроме того, в области 1 в линии распространяется электромагнитная волна, фазовая скорость которой близка к фазовой скорости невозмущенной волны в линии (δ_4 при $b > 0$ и δ_5 при $b < 0$).

В области 2 наблюдается взаимодействие МВПЗ медленного потока (δ_3) с волной линии (δ_5). В результате, амплитуда волны медленного потока нарастает ($x_3 > 0$), а амплитуда образовавшейся после взаимодействия волны (δ_4) убывает. При этом максимальное значение постоянной нарастания x_3 достигается при совпадении скорости МВПЗ медленного потока со скоростью волны в линии в точке $b = 2h$.

Фазовые постоянные y_3, y_4, y_5 при изменении параметра скорости b изменяются примерно так же, как в ЛБВ с односкоростным потоком. Отличие состоит в том, что роль медленной и быстрой волн пространственного заряда односкоростного потока в данном случае играют МВПЗ медленного потока и БВПЗ быстрого потока. При дальнейшем смещении скорости электронов v_e относительно скорости невозмущенной волны v_0 (область 3) и переходе в область отрицательных значений b происходит деформация постоянных распространения волн, скорости которых близки к средней скорости электронов (δ_1 и δ_2). При малой величине параметра QC (рисунок 2 а)) преобладает взаимодействие с линией ($x_3 > x_1$), а при большей величине QC (рисунок 2 б)) – электронно-волновое взаимодействие потоков ($x_1 > x_3$).

После решения дисперсионного уравнения был рассчитан коэффициент усиления в системе как отношение суммарного поля на выходе пространства взаимодействия $E(L)$, к суммарному полю на входе $E(0)$. Были предварительно

получены выражения для скорости и плотности тока обоих потоков в виде (4) и (5):

$$\frac{\tilde{v}_{ek}}{v_{ek}} = \frac{1}{2jV_{ek}\beta_e C} \left(\frac{(h^2 + \delta^2)(h + i\delta)}{(h^2 + \delta^2)^2 + 8QC(\delta^2 - h^2)} \right) Ez, \quad (4)$$

$$\frac{\tilde{j}_k}{I_{ek}} = -\frac{j}{2V_{ek}\beta_e C^2} \left(\frac{8QC Ch - (1 + Ceh)(h + i\delta)^2}{(h^2 + \delta^2)^2 + 8QC(\delta^2 - h^2)} \right) Ez. \quad (5)$$

Затем к ним были применены следующие начальные условия. Во-первых, сумма амплитуд всех волн на входе в пространство взаимодействия равна входному сигналу $\sum_{i=1}^5 E_i(0) = E^0$. Во-вторых, отсутствие начальной модуляции пучков по скорости и плотности: $\sum_{i=1}^5 \tilde{v}_{ki}(0) = 0$, $\sum_{i=1}^5 \tilde{j}_{ki}(0) = 0$. Были найдены амплитуды всех парциальных волн (ввиду сложности выражений и их громоздкости здесь они не приводятся). В итоге, коэффициент усиления по мощности выражался в следующем виде

$$G_{(дБ)} = 20 \log_{10} \left| \frac{E(L)}{E(0)} \right| = 20 \log_{10} \left| \sum_{i=1}^5 E_i(z) e^{(2\pi CN_L)\delta_i} \right|, \quad (6)$$

где δ_i – корни дисперсионного уравнения (3), а построенные на основе (6) зависимости $G = f(b)$ для двухлучевой ЛБВ в сравнении с однолучевой ЛБВ при одинаковых параметрах представлены на рисунках 3 а), б).

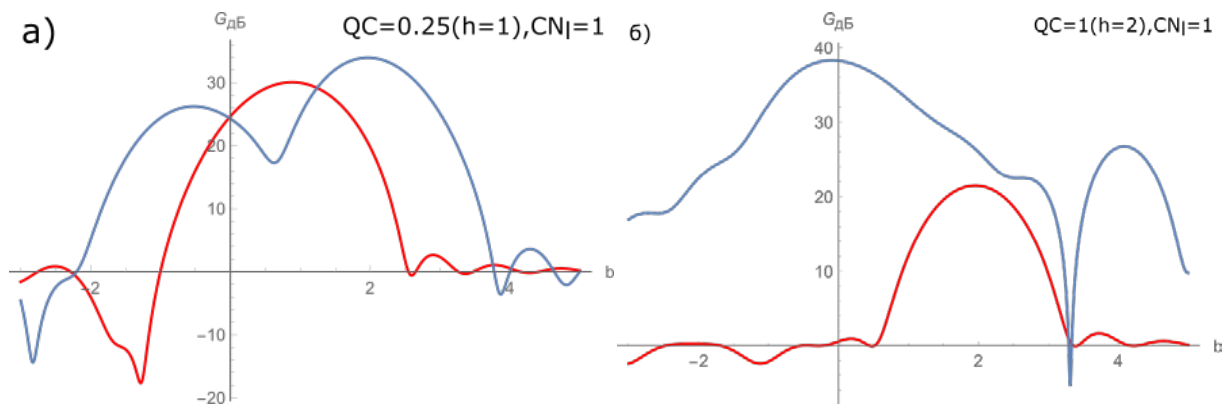


Рисунок 3 а), б) – Зависимость коэффициента усиления ЛБВ с двухскоростным потоком от параметра b . Обозначения: красный – однолучевая ЛБВ, синий – двухлучевое непрерывное взаимодействие.

Из представленных графиков следует, что существуют две области значений параметра b , усиление в которых отлично от нуля. Первый максимум усиления наблюдается при совпадении средней скорости двухскоростного

электронного потока u_e со скоростью невозмущенной волны в линии u_0 и по аналогии с однолучевой ЛБВ обусловлен электронно-волновым взаимодействием. Величина усиления в данной области сильно зависит от параметра QC , поскольку он характеризует величину группирующих сил в электронных потоках. Вторая область с центром примерно при $b = 2h$ соответствует взаимодействию МВПЗ медленного потока с волной линии. Начальная амплитуда этой волны в данной области по параметру b значительно превосходит начальную амплитуду нарастающей волны, возникающей в результате электронно-волнового взаимодействия. Поэтому основной вклад в усиление вносит медленный поток и его взаимодействие с линией, а вклад электронно-волнового взаимодействия в усиление мал.

В соответствии с представленными рисунками 3 а) и б) при большой величине параметра пространственного заряда и достаточной длине системы использование двухлучевого взаимодействия потоков может существенно повысить как усиление ЛБВ, так и рабочую полосу за счет проявления дополнительного механизма электронно-волнового взаимодействия.

После непрерывного взаимодействия в настоящей работе рассматривается решение дисперсионного уравнения (3) и нахождение коэффициента усиления для случая больших пространственных зарядов $QC = 1$ ($h = 2$) при дискретном взаимодействии электронных потоков. На рисунках 4 а) и б) приведены полученные зависимости действительной (x_i) и мнимой (y_i) частей уравнения (3) для гармоник с номерами $n = m = \pm 1$.

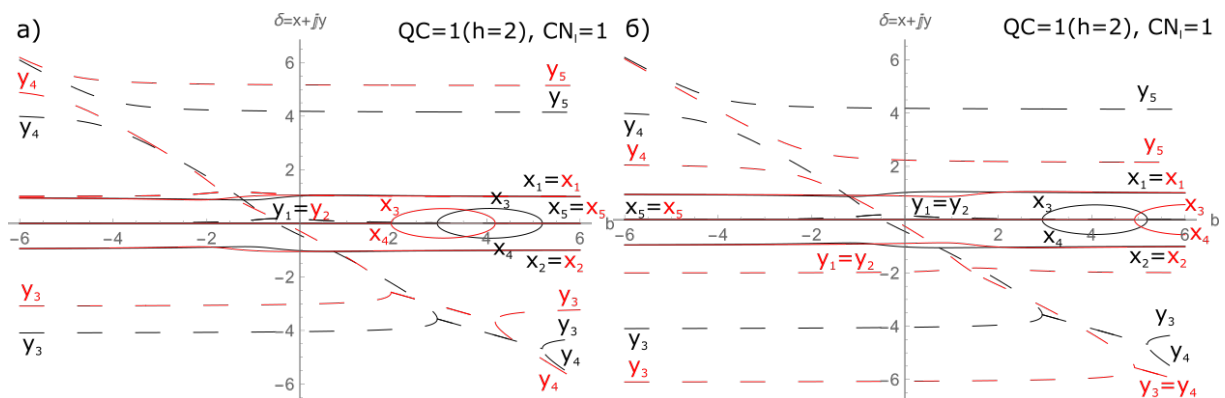


Рисунок 4 а), б) – Корни (3) от параметра b при различных n и m : а) $n = m = 1$, б) $n = m = -1$. Обозначения: черный пунктир – мнимая часть корней (3) для $n = m = 0$, сплошной черный – действительная часть корней (3) для $n = m = 0$, красный пунктир – мнимая часть корней (3) для $n = m = \pm 1$, сплошной красный – действительная часть корней (3) для $n = m = \pm 1$.

В соответствии с рисунком 4 а) видно, что в дискретном случае, для заданных номеров гармоник, по-прежнему наблюдается преобладание электронно-волнового взаимодействия ($x_1 > x_3$). Однако происходит смещение области изменения амплитуды волн (δ_3, δ_4) в сторону меньших значений параметра b , а также расширяется область преобладания фазовой скорости волны над средней скоростью электронов ($y_1 > 0$ и $y_2 > 0$). Стоит отметить, что по мере роста параметра характеризующего дискретность CN_l , поведение корней будет всё ближе к случаю непрерывного взаимодействия.

Для отрицательных номеров гармоник (рисунок 4 б)) область нарастания амплитуд волн будет смещена в сторону больших значений параметра b . Для двух парциальных волн (δ_1, δ_2) значения мнимой части корней (y_1, y_2) смещаются в отрицательную область, где происходит преобладание средней скорости электронов над фазовой скоростью волны.

В работе рассмотрены также и случаи $n \neq m$ для первых номеров гармоник обоих потоков. Результаты показывают, что в зависимости от значения параметра CN_l будет преобладать электронно-волновое взаимодействие, взаимодействие с линией или при сильной разнице скоростей электронных потоков друг относительно друга, взаимодействие двух ЛБВ.

Что же касается коэффициента усиления, то он определялся по аналогии с непрерывным взаимодействием, только теперь номера гармоник n и m отличны от нуля. Полученные результаты отражены на рисунке 5.

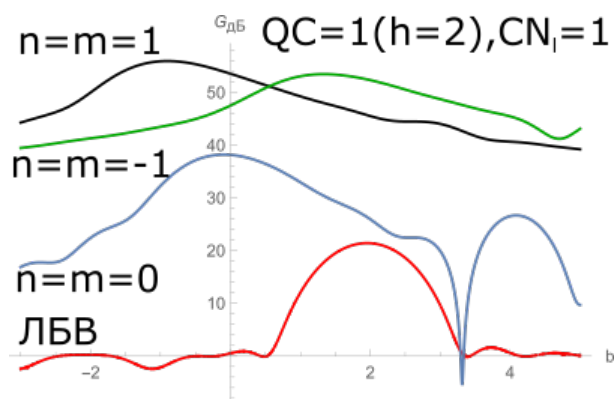


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента усиления от параметра b . Обозначения: красный – ЛБВ, черный – дискретное взаимодействие с номерами $n = m = 1$, синий – двухлучевое непрерывное взаимодействие $n = m = 0$, зелёный – дискретное взаимодействие с номерами $n = m = -1$.

Из представленных зависимостей видно, что введение дискретного характера взаимодействия потоков теоретически показывает лучшие результаты по сравнению как с обычной ЛБВ, так и с двухлучевой ЛБВ в которой взаимодействие носит непрерывный характер. Из положительных особенностей можно отметить, что сильно увеличилась область усиления по параметру b , а также заметен рост коэффициента усиления в данной системе. Минусом является то, что в подобной модели не учитывается расстояние между потоками, что теоретически должно повлиять на прохождение потоков друг относительно друга и итоговое значение коэффициента усиления в системе.

Вторая часть настоящей магистерской работы посвящена моделированию исследуемой системы в программе CST studio suite в статическом режиме и разработке технологического маршрута изготовления прибора. После долгих исследований и расчетов была разработана достаточно компактная конструкция ($4 \times 4 \times 10$ мм), рассчитанная на гигагерцовый диапазон длин волн, представленная на рисунке 6.

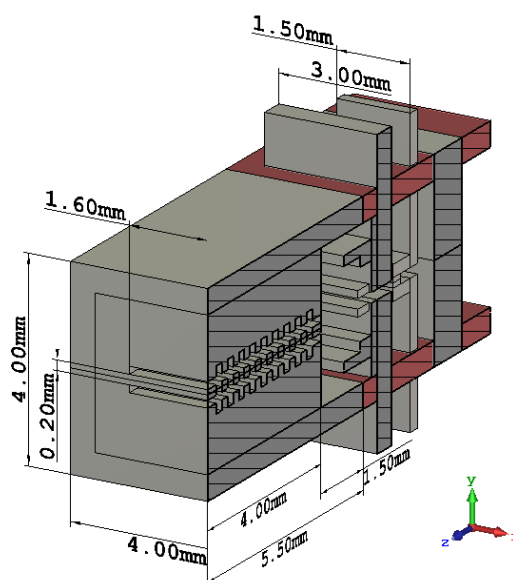


Рисунок 6 – Сечение конструкции. Серым цветом обозначены металлические части, а красным – керамика.

При её разработке был учтен тот факт, что катоды должны быть под разным потенциалом относительно замедляющей системы и мембраны с отверстиями, расположенной в центре между электронными каналами. На рисунке 7 представлен результат моделирования электронной оптики [18,19] при следующих параметрах: ускоряющее напряжение верхнего катода $U_г = -1450$ В, а нижнего $U_н = -1550$ В, на аноде $U_a = 0$ В.

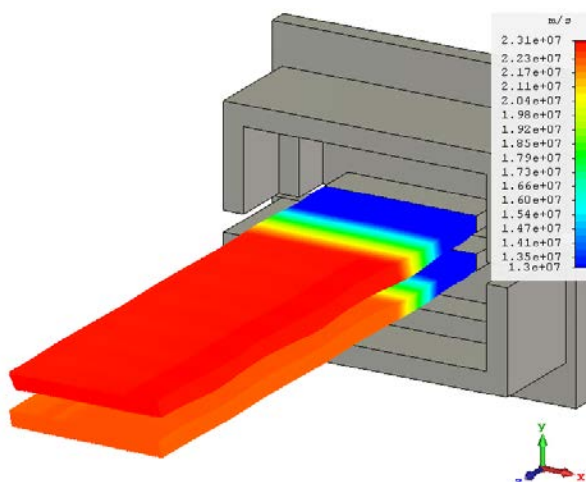


Рисунок 7 – Два ленточных электронных потока.

Результаты показали, что в подобной системе будут распространяться два разноскоростных почти ламинарных ленточных электронных потока с хорошим токопрохождением (ток верхнего $I = 3.933 \cdot 10^{-2}$ А, ток нижнего

$I = 1.553 * 10^{-2}$ А), без оседания на стенках каналов. Было проведено исследование распределения потенциала в каналах и между потоками, что подтвердило взаимное влияние пучков друг на друга.

После моделирования конструкции прибора был разработан и представлен технологический маршрут изготовления его основных компонентов: замедляющей системы с отверстиями, катодов с основаниями и керамической части, на основе метода LIGA – технологии [20] (ввиду объемности данной части работы её конечные результаты здесь не приводятся). Выбор данной технологии обусловлен тем, что она позволит в массовом количестве, причем достаточно точно создать такую компактную и в то же время объёмную структуру.

Заключение. Данная магистерская работа посвящена разработке теории дискретного взаимодействия двух электронных потоков и включает в себя теоретический анализ, математическое моделирование электронно-оптической задачи (в статическом режиме работы) в программе CST studio suite, а также содержит технологический маршрут возможного варианта изготовления рассматриваемой конструкции методом LIGA–технологии.

Разработанная на основе теории непрерывного взаимодействия электронных потоков и метода пространственных гармоник, аналитическая теория дискретного взаимодействия двух электронных потоков, при одинаковых параметрах системы, показала лучшие результаты (рост полосы усиления и повышение коэффициента усиления), по сравнению с моделью двух непрерывно взаимодействующих потоков, а также с классической теорией однолучевой ЛБВ.

Использование в модели фокусирующего магнитного поля величиной 0,5 Т позволило разработать достаточно компактную модель лампы с дискретным взаимодействием двух разноскоростных ленточных почти ламинарных электронных потоков, электронно-оптическая часть которой, в гигагерцовом диапазоне, с учетом влияния потоков друг на друга, была просчитана в программе CST. Моделируемая конструкция, в первом приближении, показала

свою работоспособность, однако требуются дальнейшие улучшения, например, следует продумать конструкцию ввода и вывода энергии.

На основе технологии микросистемной техники (LIGA–технологии) были разработаны несколько вариантов создания компонентов исследуемой конструкции, а также представлены технологические маршруты их изготовления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Титов А.В., Двухпотоковая неустойчивость - волновые линейные и нелинейные явления на сверхвысоких частотах. Часть I.
- 2) Zhang Y. and Dong L. Enhanced coherent terahertz Smith-Purcell superradiation excited by two electron-beams. OPTICS EXPRESS, Vol. 20, No. 20, 24 September 2012.
- 3) Zhang Y., Zhou Y., Dong L. THz radiation from two electron-beams interaction within a bi-grating and a subwavelength holes array composite sandwich structure.
- 4) В.Н. Шевчик, Д.И. Трубецков. Дискретное взаимодействие двух электронных потоков. // Известия ВУЗов СССР – Радиотехника, 1962, Т. V, № 2, с. 143
- 5) Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М. Изд-во МЭИ, 2011, 155 с.
- 6) Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. 103 с.
- 7) Haeff A.V. The electron - wave tube - a novel method of generation and amplification of microwave energy. Proc. IRE, 37, 4-10 (1949).
- 8) Pierce J.R. Double-stream amplifiers. Proc. IRE, 37, 980-985 (1949).
- 9) 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.
- 10) Солнцев В.А., Тагер А.С., О периодическом взаимодействии электронных потоков, Изв. вузов СССР - Радиофизика, 1959, 2, 1, 101.
- 11) Бернашевский Г.А. Пространственные гармоники электронной волны. Письма в редакцию. радиотехника и электроника, 2, 124-125 (1957).
- 12) В.А. Солнцев, А.С. Тагер. Электронные волны и их взаимодействие с полем волноводных систем. // Радиотехника и электроника, 1959, № 10, с. 1652.

- 13) В.Н. Шевчик, Г.Н. Шведов, А.В. Соболева. Волновые колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Издательство Саратовского университета, 1962.
- 14) OPTICS EXPRESS, Vol. 21, No. 19, 23 September 2013.
- 15) Шевчик В.Н., Трубецков Д. И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М. Изд-во «Советское радио», 1970, 584 стр.
- 16) В.Н. Шевчик, Д.И. Трубецков. Дискретное взаимодействие двух электронных потоков. // Известия ВУЗов СССР – Радиотехника, 1962, Т. V, № 2, с. 143
- 17) Дж. Р. Пирс, Лампа с бегущей волной, перев. с англ., Изд. Советское радио, 1952.
- 18) Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. – М.: Атомиздат; 1979, с. 224.
- 19) Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. М., «Советское радио», 1966.
- 20) Ehrfeld W., Hessel V., Lowe H., Schulz Ch., Wber L. Material of LIGA technology // Microsystem Technologies. – 1998. - № 5. – pp. 44-48.