

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии  
наименование кафедры

**Разработка ЛБВ миллиметрового диапазона.**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 206 группы

направления 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии»  
код и наименование направления

факультета nano- и биомедицинских технологий

наименование факультета

Остапенко Алексея Андреевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н  
должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Б.П. Безручко  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., доцент  
должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Е.П. Селезнев  
инициалы, фамилия

Саратов 2017 г.

## **Введение**

**Актуальность.** Для современного этапа развития радиоэлектронной аппаратуры сверхвысоких частот и техники связи, в частности, характерным является жесткая конкуренция между твердотельными и электровакуумными приборами. Однако, несмотря на значительный прогресс в развитии твердотельной СВЧ электроники, область частот, превышающих 5 ГГц, в настоящее время остается практически недоступной для полупроводниковых приборов, особенно для уровней непрерывной (средней) мощности 50 Вт и выше

Помимо чисто частотных и энергетических соображений немаловажным фактором, определяющим выбор элементной базы и принципов конструирования радиотехнических устройств, является учет таких условий эксплуатации, как устойчивость приборов к колебаниям температуры окружающей среды в пределах от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , их способность выдерживать кратковременные перегрузки электрического режима, достигающих 150-200% от номинальных значений и другие. Более высокая надежность при экстремальных условиях эксплуатации является одним из характерных достоинств электровакуумных приборов используемых для генерирования и усиления СВЧ колебаний[1].

Успехи электровакуумной технологии, позволившие увеличить ресурс современных ЭВП, долговечность которых исчисляется годами непрерывной работы, не дают микроволновым твердотельным приборам безусловного преимущества и в этом вопросе.

Одним из наиболее интересных и перспективных направлений современной электронной техники является направление, связанное с разработкой СВЧ ЛБВ. Такие приборы находят широкое применение в различной аппаратуре: в радиолокационных станциях дальнего и ближнего обнаружения и сопровождения целей, в системах радиоэлектронного противодействия, навигационных системах, системах управления огнем и

зенитно-артиллерийских комплексах на кораблях. В научных исследованиях: данный диапазон используется в метеорологии, определяя температуру в верхних слоях атмосферы со спутника, помогает наблюдению за климатом и его прогнозированию. В телекоммуникациях данный диапазон используется для связи на короткие расстояния до двух километров с пропускной способностью три гигабита в секунду, а следующий стандарт WiFi обеспечит передачу данных со скоростью до восьми Гигабит в секунду. Есть планы для применения этого диапазона для сотовой связи стандарта 5g. Миллиметровый сканер СВЧ диапазона обеспечивает безопасность в аэропортах получая детальные при сканировании человеческого тела. Также СВЧ применяется и в медицине: СВЧ терапия, для лечения и профилактики многих болезней, обеззараживание медицинского оборудования, нано ножи для лечения рака. Столь широкое распространение рассматриваемые приборы получили в связи с существенным упрощением аппаратуры питания, значительным сокращением веса и габаритов аппаратуры, повышением ее эксплуатационной надежности и долговечности. Благодаря своим преимуществам ЛБВ в последние годы находят применение все в более сложных и дорогостоящих системах, где требуется не просто повышенная мощность выходного сигнала, а сложная и противоречивая комбинация целого ряда выходных электрических и эксплуатационных характеристик прибора, наиболее полно удовлетворяющая каждому конкретному применению. В частности, такие приборы стали незаменимыми для бортовых радиоэлектронных систем, требования к элементам которых являются наиболее жесткими. [2].

## Основное содержание работы.

Для начала проводим расчет основных параметров ЛБВ в программе EOS - программа, предназначенная для расчета согласования пучка с магнитным полем. EOS проводит предварительную оценку параметров электронно-оптической системы с учетом высокочастотных параметров лампы, позволяющая по заданным параметрам прибора ( частотному диапазону, уровню выходной мощности, КПД) оптимальным образом определить индукцию магнитного поля, плотность тока и, следовательно, диаметр катода пушки(исходя из оптимальных значений плотности тока на катоде). В соответствии со структурой программного комплекса расчет начинается с определения параметров, удовлетворяющих проектируемому прибору с заданными выходными параметрами. В итоге получаем данные представленные в таблице 1

Таблица 1

F	jc	Pout	U	Eff	Rp/Rtun	Rc	Io	Rtun	Bo
f0	4.7	105	14	0.05	0.6	1	0.15	0.275	3.800

И геометрически характеристики СЗС по которым в дальнейшем будем производить расчет рис1

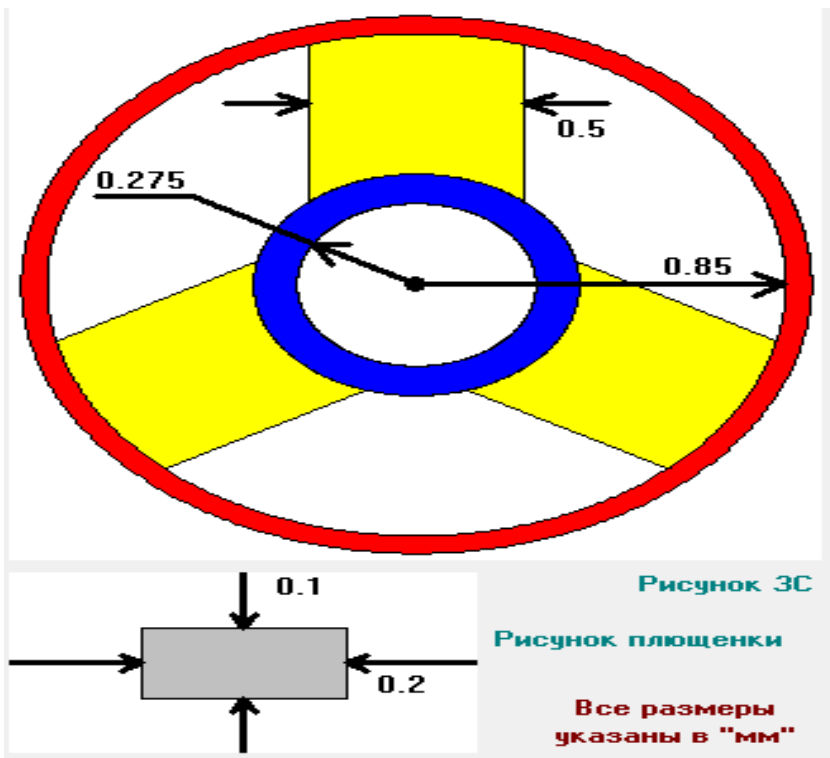


Рисунок1. Схематическое изображение пространства взаимодействия с размерами в мм.

По полученным данным строим модель одного витка с различной геометрией стержней в программе HFSS - это мощный пакет программ, который вычисляет многомодовые S-параметры и электромагнитные поля в трехмерных пассивных структурах произвольной формы. Основу решения трехмерных и двухмерных задач электродинамики в HFSS составляет метод конечных элементов. Смысл метода состоит в том, что пространство разбивается на простейшие элементы, имеющие форму тетраэдров. Проводим расчет электродинамических характеристик нашей ЛБВ.

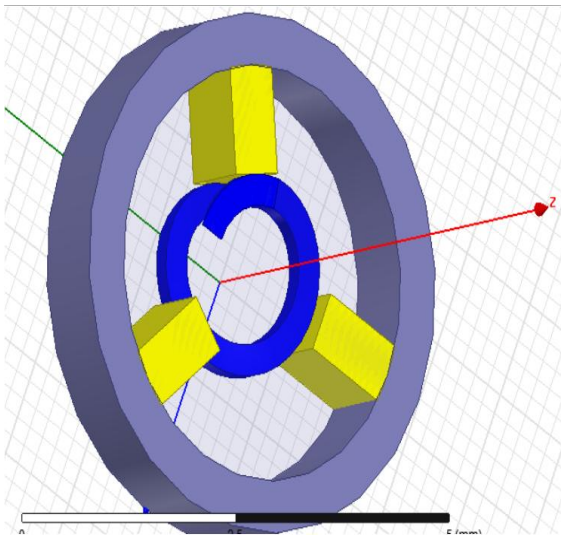


Рис 2 Прямоугольный стержни

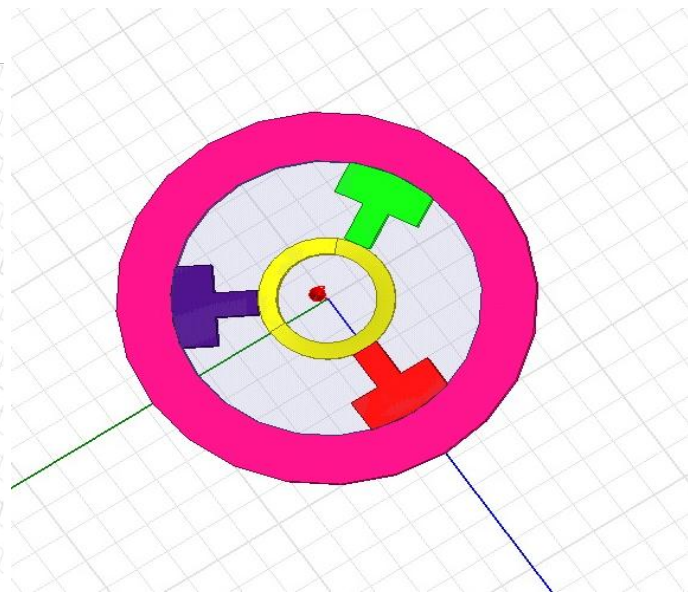


Рис 3. Т –образные стержни

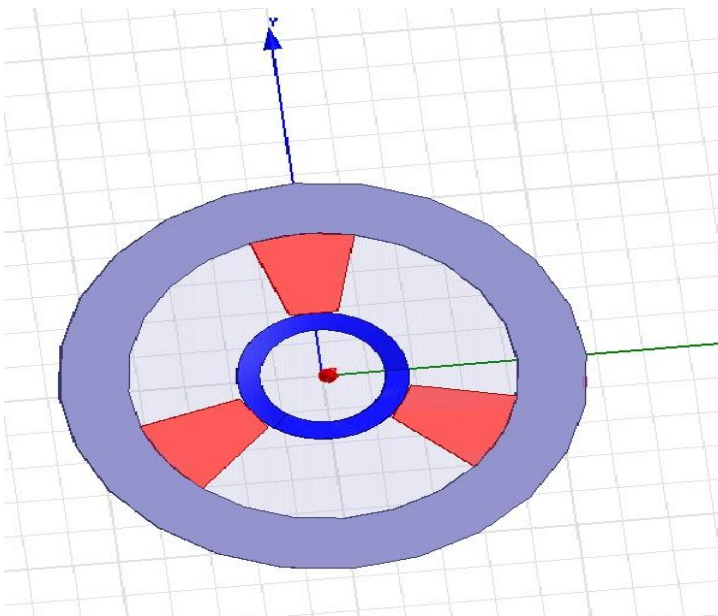


Рис 4. Т –образные стержни

Изменение конструкции стержня привело к уменьшению диэлектрической нагрузки и снижению параметра затухания на 7%, и увеличению сопротивления связи на 20%(Т-образные стержни) по сравнению с классической (прямоугольные стержни) конструкцией (рисунок 5) что в дальнейшем положительно скажется на выходных параметрах нашей ЛБВ.

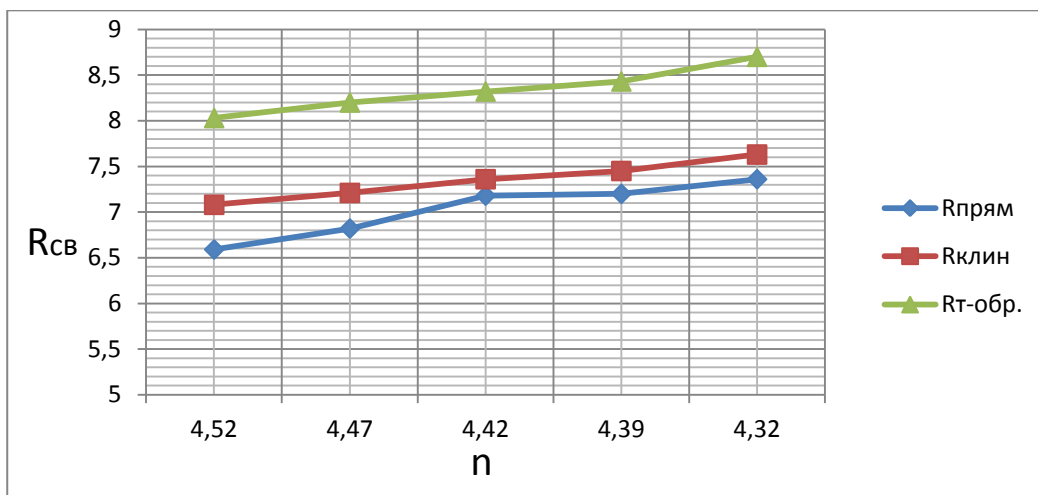


Рис5. Зависимость сопротивления связи ( $R_{св}$ ) от замедления ( $n$ ) для стержней с различной формой

Далее в работе проводилось построение пространства взаимодействия ЛБВ с учетом скачков шага для лучшего усиления и расположения поглотителей (рис 7). Расчет выходных параметров (таблица 2) ЛБВ проводился в программе SHELL - Программа, по которой производились вычисления, предназначена для расчета выходных характеристик лампы бегущей волны со спиральной замедляющей системой в полосе усиливаемых частот. Процессы взаимодействия бегущей электромагнитной волны с электронным пучком в ЛБВ описываются системой интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнения возбуждения, уравнения движения заряженных частиц и уравнения для расчета гармоник тока.

Таблица 2.

КПД %	К <sub>и</sub> , дБ	Р <sub>выч</sub> , Вт	Длина.	Р <sub>вх</sub> , мВт
6,22	51,11	130	1,04L <sub>0</sub>	0,14

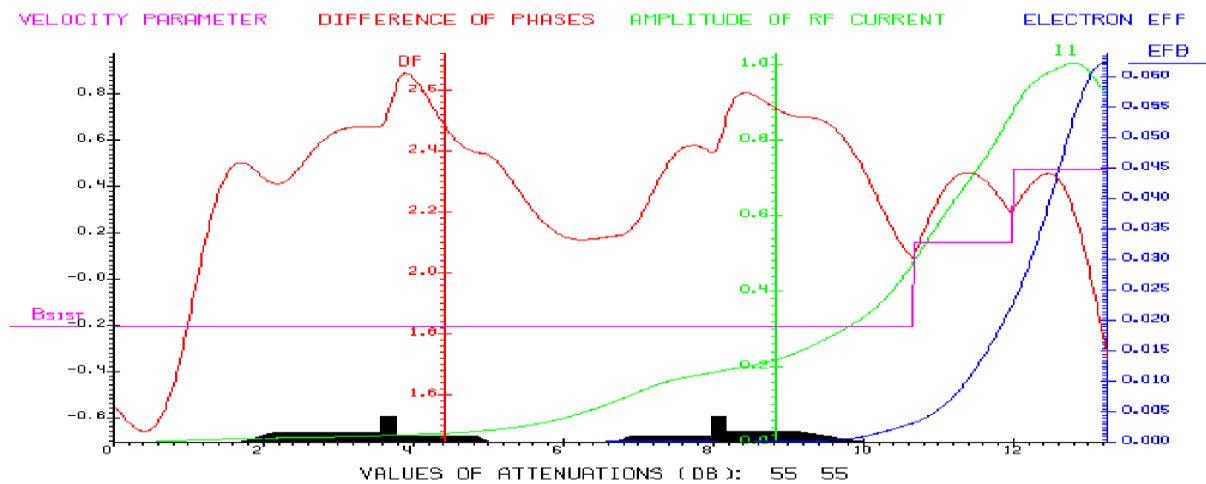


FIG. VALUES B1, DF, I1, EFF AS FUNCTION OF Z

Рис. 6 Параметр несинхронности (B), разность фаз (DF), электронный КПД (EFF)

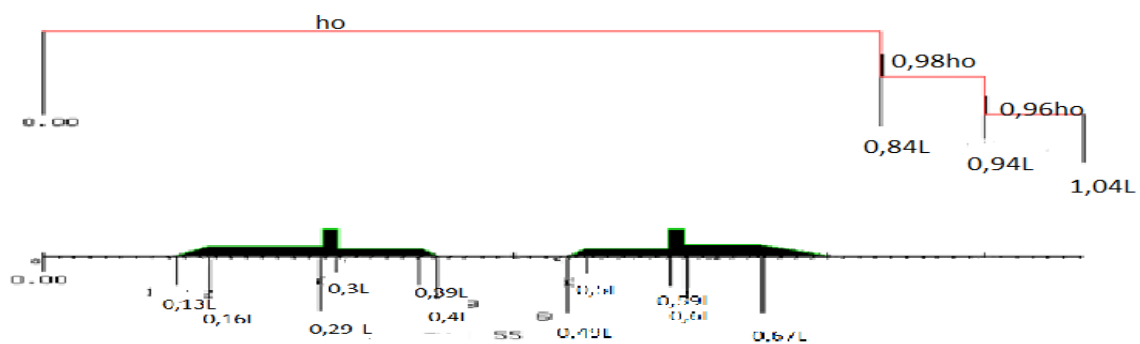


Рис. 7 Пространство взаимодействия с распределением шагов и поглотителей для спирально замедляющей системы с т-образными стержнями.



Далее возвращаемся в программу EOS и рассчитываем МПФС нашего прибора (Рисунок 8) со всеми необходимыми размерами.

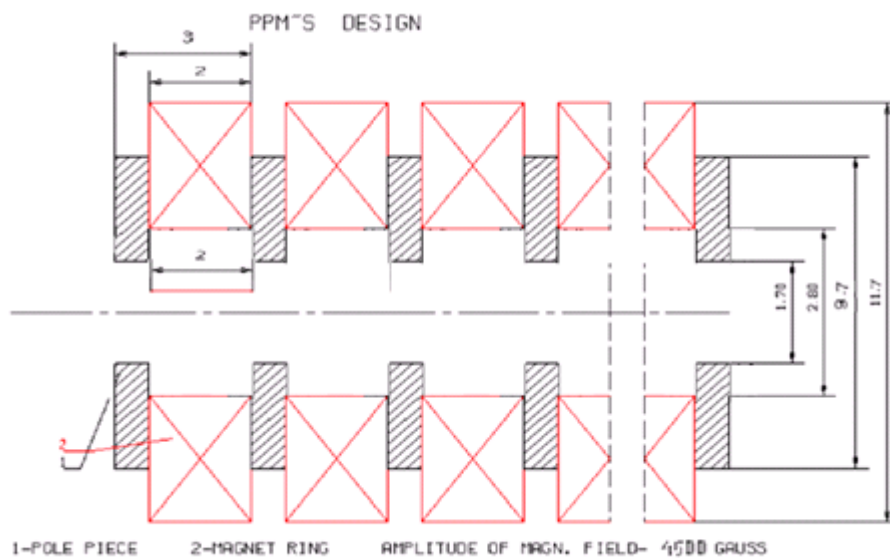


Рис.8 Посчитанная МПФС.

Ширина магнита 2 мм, внутренний диаметр 2.8 мм, внешний – 9.7 мм, магнитные наконечники с шириной 1 мм, внутренним диаметром 1.7. Период МПФС равен 6 мм. Данная система обеспечивает на оси прибора магнитное поле равное 4500 Гс.

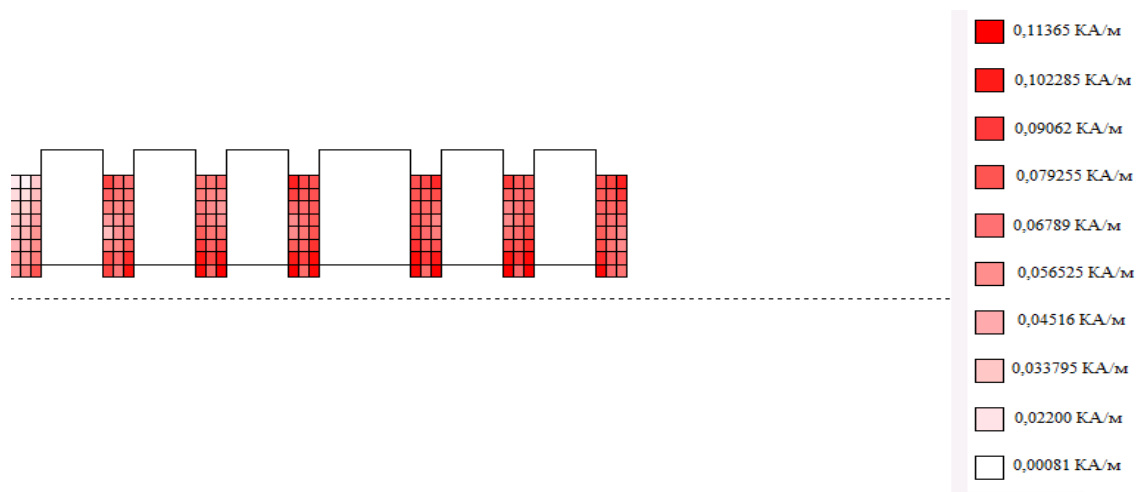


Рис 9. Напряженность магнитного поля на наконечниках.

Рисунок 9 характеризует возможность создания такой МПФС, имеется в виду, что магнитные наконечники не насыщаются, так как величина напряженности на них мала ( $\ll 1$ ).

Следующим шагом было проектирование оптико-электронной составляющей ЛБВ. Первым делом спроектировали пушку в программе синтеза (рис 10) со всеми геометрическими параметрами и просчитали в ней электронные траектории (Рис 11), а также сопровождения пучка рассчитанной МПФС в пространстве дрейфа (Рис 12). Программа разработана на основе уравнений теории формирования электронных пучков, она позволяет синтезировать аксиально-симметричные электронные пушки с требуемыми значениями первеанса и компрессии пучка, аппроксимировать кривые синтезированные поверхности фокусирующего электрода и анода цилиндрами и конусами и рисовать эскиз пушки со всеми размерами электродов и межэлектродных расстояний, а также находить распределение плотности тока в поперечном сечении пучка в кроссовере.

Предполагается, что траектории пучка не пересекаются. Кроме того, не учитываются релятивистские эффекты.

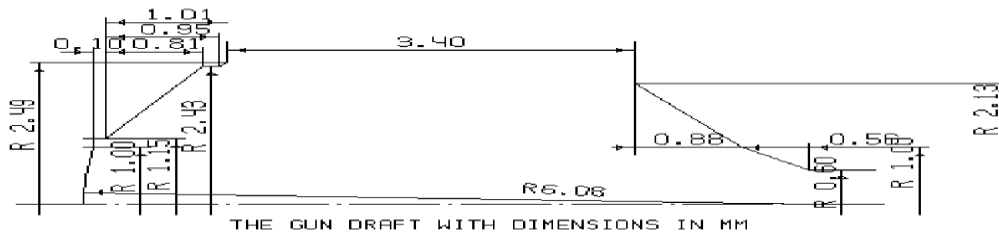


Рис 10. Эскиз пушки со всеми размерами электродов и межэлектродных расстояний

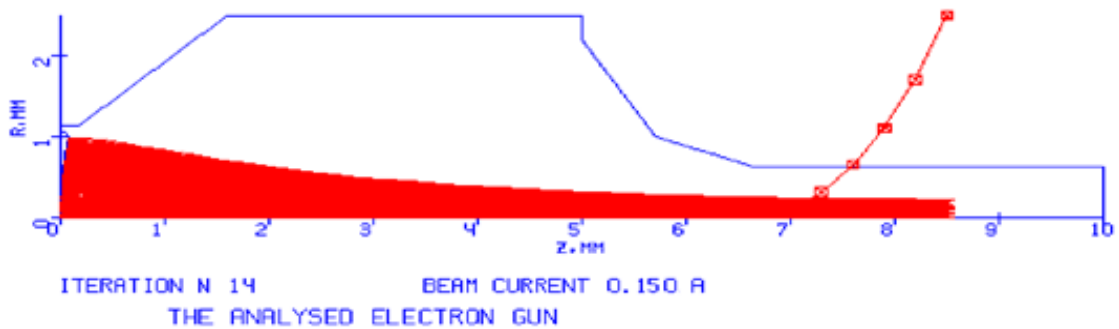


Рис. 11 Электронные траектории в пушке полученной методом синтеза.

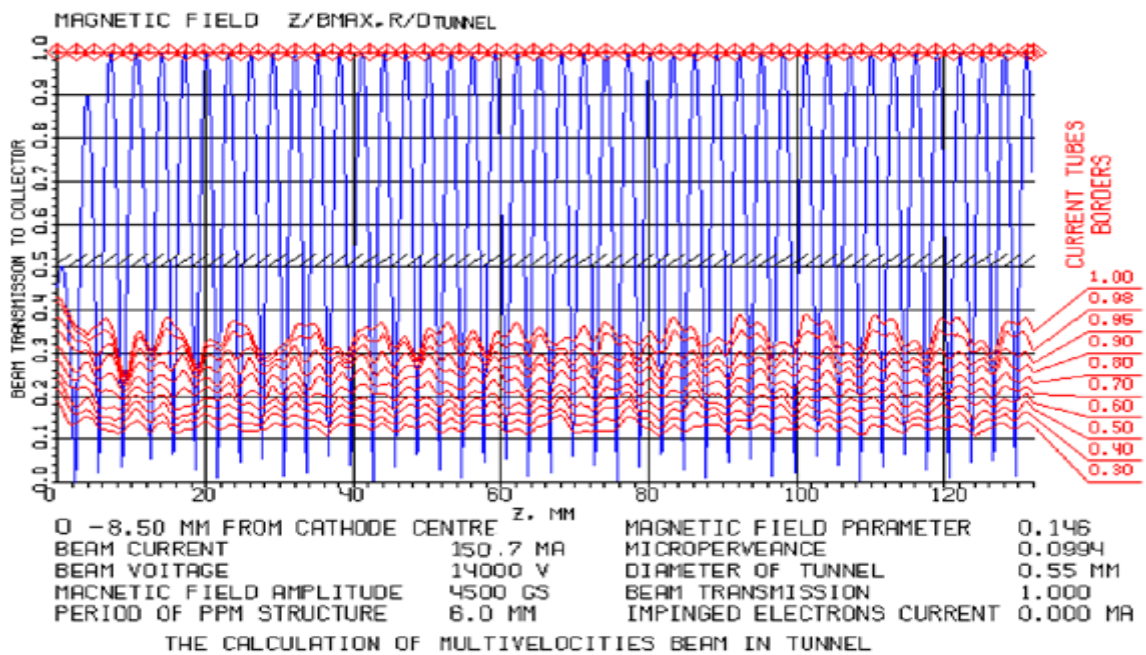


Рис. 12 Согласованный электронный пучок в пролетном канале с заполнением 0.65.

Заключительным шагом данной работы является расчет построение модели коллекторной части ЛБВ( рис 13) и расчет распределения электронов в нем ( рис14). Расчет проводился методом крупных частиц. Использовались значения энергии 24 частиц полученные в программе расчета выходных параметров.

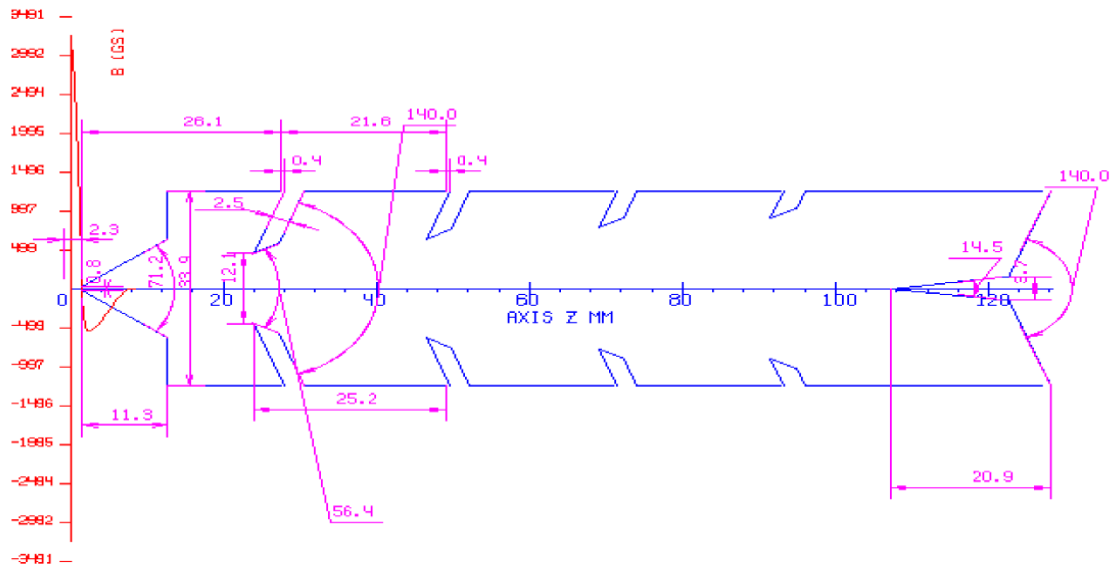


Рис.35 Конфигурация пятиступенчатого коллектора со всеми технологическим размерами.

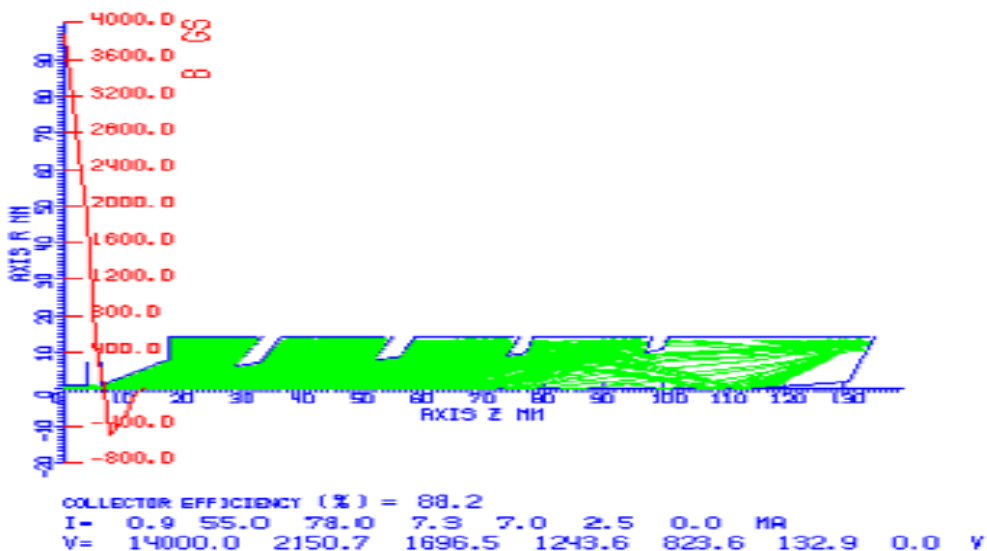


Рис.38 Модель коллектора в программе анализа с рассчитанными траекториями электронов, включая вторичные, упруго и неупруго отраженные, потенциалами и токами на ступенях

Практически все первичные электроны влетают в коллектор и оседают в нем. Обратный поток первичных и вторичных электронов из коллектора равен 0.9 мА. Видно, что отражатель, создавая радиальную компоненту электростатического поля, вынуждает электроны отклоняться от оси, и первичные электроны оседают на обращенные к игле поверхности электродов.

И по формуле получили технический КПД прибора равный:

Проведенный траекторный анализ показал, что удалось получить коллектор с КПД 88.2% и техническим КПД:

---

### **Заключение.**

В результате работы была спроектирована оптимальная конструкция ЛБВ 5 мм диапазона с выходной мощностью 130 Вт и усилением 51.1 дБ.

Рассмотрена СЗС с различной формой стержней и скачками шага для получения максимального КПД. Предложенная СЗС с Т-образными стержнями позволила увеличить сопротивление связи на 20% по сравнению с прямоугольными.

По программам синтеза и анализа проведено проектирование электронной пушки с требуемыми характеристиками электронного пучка.

На основе расчетов выбрана конструкция МПФС, обеспечивающая поле на оси ЛБВ с амплитудой 4500 ГС и периодом 6мм.

Проведены расчеты сопровождения электронного пучка с помощью МПФС в протяженном, длиной 132 мм, канале ЛБВ диаметром 0,55мм с минимальными пульсациями и заполнением 0,65.

Для Повышения электронного КПД, равного 6%, на основе расчетов спроектирована конструкция пятиступенчатого коллектора с рекуперацией и КПД равным 88.2%, что позволило увеличить технический КПД до 42%.

В результате работы на основе современного программного обеспечения проведена проектировка ЛБВ 5 мм диапазона с выходной мощностью 130 Вт.

### Список литературы.

1. Научное издание Электронные приборы и устройства СВЧ: Материалы научно-технической конференции. 5-7 сентября 2012г. Издательство Саратовского университета, 2012.
2. А.М. Кац, М.Б. Цейтлин «Лампа с бегущей волной». Советское радио, 1964 — 308 с.
3. С. П. Морев, В. Д. Журавлева, В. А. Филатов, Е. К. Полищук, А. Ю. Кивокурцев, В. И. Роговин. «Электронная техника. Сер. электроника СВЧ» вып. 4(428) 1990.
4. В. Г. Бороденко, Ю. П. Мякинков и др. Метод оперативного комплексного расчета спиральной ЛБВО по заданным усилению выходной мощности. Математическая модель. Электротехника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1982. – Вып.4(с .64-70).
5. Р.А. Силин, В.П.Сазонов «Замедляющие системы» С.61. 1966 г., «Советское радио».
6. HFSS – High Frequency Structure Simulation. Manual, Ansoft, 2004. [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com)
7. Н.А. Бушуев, В.И. Роговин, С.О. Семенов, Ю.Ф. Конторин «Расчет выходных характеристик лампы бегущей волны» Проектирование спиральной лампы бегущей волны и расчет выходных характеристик.
8. А.С. Гилмор-мл. «Лампы с бегущей волной» 2013

9. Пензяков В.В., Финкельштейн Ю.Х. «Расчёт характеристик замедляющей системы типа спираль в профилированном экране методом интегральных уравнений». // Электронная техника, Сер1, Электроника СВЧ. – 1984 – Вып.8. – С.29-32.
10. В.Д. Журавлева, Е.М. Ильина Ю.Ф. Конторин и др. компьютерное моделирование современных ламп бегущей волны различного назначения 2001
11. Grigorjev Yu. A., Juravleva V.D., Morev S.P. et al. Analysis Code of EOS with many-velocities electron beam // Electronic Techniqs, Ser.1, Microwave Electronics.- 1988.-No. 1.
12. Penzyakov V.V. The Electron Guns Calculation with the Aid of Electron Numerical Computers // Electronic Techniqs, Ser.1, Microwave Electronics. - 1966. – No.1. - P. 41 – 49.
13. Singer B., Braun M. Integral Equation Method for Computer Evaluation of Electron Optics // IEEE Trans., ED-17. - 1970. - No. 10. - P. 926 - 934
14. Juravleva V.D., Morev S.P., Penzyakov V.V., Rogovin V.I. The Code of many-velocities axial-symmetric beam calculation in magnetic field // Electronic Techniqs, Ser.1, Microwave Electronics.- 1985. –No. 1.
15. В.И.Роговин, С.О.Семенов. Коллекторы с рекуперацией для ЛБВО и клистронов // Обзоры по электронной технике. Сер.І, Электроника СВЧ.- 1986.-Вып.4-С.1-70.
16. Пензяков В.В, Роговин В.И. Расчет многоступенчатых коллекторных систем // Электронная техника. Сер.І, Электроника СВЧ.-1977.-Вып. 10.- С.84-91.

Журавлева В. Д., Пензяков В.В. Роговин В. И. Программа анализа аксиально-симметричных коллекторных систем. //Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ. 1977. - №1. - с. 123.