

Л и т е р а т у р а

1. Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я., Сурков В. А.// Прикладная физика. 2006. № 3. С. 88.

2. Овсянникова Л. П., Пасовец С. В., Фишкова Т. Я.//ЖТФ. 1992. Т. 62. № 12. С. 1. (Sov. Phys. Tech. Phys. 1992. V. 12. P. 1215).

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Electrostatic energy filter with double focusing

L. P. Ovsyannikova, T. Ya. Fishkova

A. F. Ioffe Physical-Technical Institute RAS, St.-Petersburg, Russia

We have proposed and calculated an energy filter composed of a cylinder with some potential and a grounded flat electrode placed in the meridional plane of the cylinder. The charged particle beam is injected and extracted via end grounded diaphragms. Parameters of this system are numerically calculated in a wide range of its geometry. Our system has two modes of operations: double angle focusing on the flat electrode and regime of parallel-transport.

УДК 621.385.632

Оптимизация многоступенчатых коллекторов произвольной конфигурации с рекуперацией для приборов О-типа

В. Д. Журавлева, В. И. Роговин, И. В. Роговин

ФГУП «НПП «Алмаз»», г. Саратов, Россия

Дано описание алгоритмов и программ расчета и оптимизации многоступенчатых коллекторов с торможением произвольной конфигурации для ламп бегущей волны (ЛБВ) и клистронов. Функцией цели является КПД коллектора, а варьируемыми параметрами — потенциалы и конфигурация ступеней коллектора, величина и распределение магнитного поля. Для неаксиально-симметричных многоступенчатых коллекторов (МК) оптимизированы смещение, наклон электродов и распределение магнитного поля.

Введение

Использование в ЛБВ МК позволяет существенно повысить технический КПД и сделать их основным сверхвысокочастотным (СВЧ) усилителем для использования в системах связи, локации и навигации. Проектирование МК основано на методах расчета, использующих анализ заданной конфигурации с распределениями электростатических и магнитных полей. Получение оптимального МК с высоким КПД достигается после проведения большого числа расчетов и наличия большого опыта проектирования МК. Сокращение времени проектирования МК возможно за счет применения одного из методов оптимизации, позволяющего варьировать конфигурацию МК, величины потенциалов ступеней и распределения магнитного поля.

Цель данной работы — разработка метода расчета и оптимизации МК.

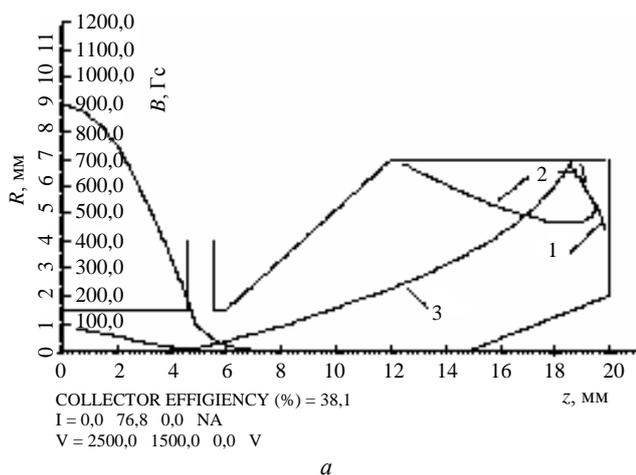
Расчет и оптимизация многоступенчатых коллекторов

В качестве метода расчета выбран приведенный в работе [1] метод анализа аксиально-симметричных МК, состоящий из нахождения потенциала электростатического поля в МК заданной конфигурации с известным потенциалом на границе с помощью решения интегрального уравнения Фредгольма I рода; определения траекторий многоскоростного электронного потока, моделируемого первичными и вторичными крупными частицами, и последующего вычисления интегральных характеристик, таких как КПД коллектора, значения токов ступеней и выделяемой на них мощности электронного потока.

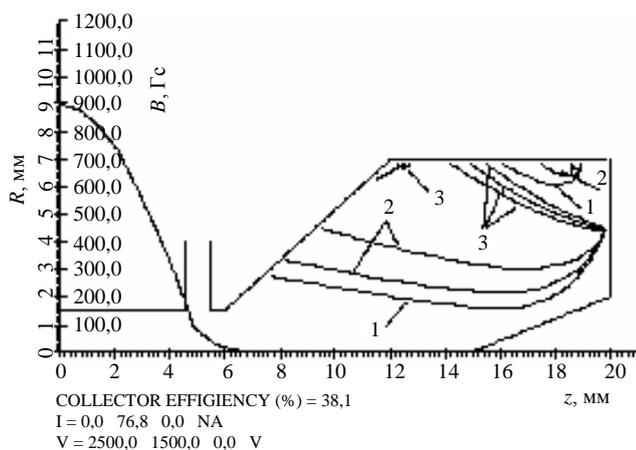
Непрерывное распределение заряда на границе МК заменено дискретным набором заряженных колец. Если центры этих колец не лежат на одной прямой, а плоскости непараллельны, то метод позволяет рассчитывать электростатическое поле

внутри МК сложной конфигурации, электроды которого имеют поперечное смещение или наклон. При переходе от цилиндрической системы к декартовой решаются трехмерные уравнения движения первичных и вторичных крупных частиц многоскоростного пучка в неосесимметричном коллекторе [2] с последующим вычислением вышеперечисленных интегральных характеристик.

В предлагаемом методе расчета усложнена модель вторичной эмиссии. Одновременно учитываются влияние истинно вторичных, упруго и неупруго отраженных частиц, а также частиц второй генерации второго поколения вторичных электронов. Если энергия первичной частицы в момент оседания больше энергии, задаваемой в числовом материале, то при ударе первичной частицы в поверхность коллектора (рис. 1, а) образуются шесть частиц: три из них моделируют истинно вторичные электроны, две — неупруго отраженные и одна — упруго отраженные электроны (см. рис. 1), иначе вторичные электроны не вылетают.



а



б

Рис. 1. Траектории:

а — первичной и вторичных частиц;

1 — вторичная упруго отраженная частица; 2 — вторичные неупруго отраженные частицы; 3 — первичная частица;

б — вторичной эмиссии второй генерации:

1 — упруго отраженные частицы; 2 — неупруго отраженные частицы; 3 — истинно вторичные частицы

Такое минимальное количественное описание вторичной эмиссии вызвано тем, что динамический пучок описывается несколькими тысячами крупных первичных частиц. Совместно со вторичными число частиц возрастает до десятка тысяч, что неоправданно увеличивает время счета. Если энергия вторичной частицы в момент оседания больше энергии, задаваемой в числовом материале, то из точки оседания вторичной частицы вылетают вторичные частицы второй генерации, моделируемые тремя группами (см. рис. 1, б), иначе расчет частиц не производится.

При применении многоскоростной стационарной модели процессов в коллекторе начальные данные, описывающие характеристики пучка на входе в коллектор, задаются как в работах [1, 2] с использованием аналитического описания либо по результатам расчета ЛБВ по двумерной модели. Модернизированная двумерная программа расчета ЛБВ [3] состыкована с двумерной программой расчета коллектора.

Расширены возможности постпроцессора. Результаты расчетов записываются во внешнюю память и позволяют выводить на печать траектории любых первичных или вторичных частиц, вторичных или отраженных частиц с любого участка поверхности коллектора и определять, какие и сколько частиц приходят на эти или иные участки коллектора, предколлектора и замедляющую систему. Это дает возможность судить о влиянии вторичной эмиссии и отраженных электронов на характеристики коллектора и находить способы его уменьшения.

В основу предлагаемого метода расчета и оптимизации аксиально-симметричных и неаксиально-симметричных МК положены описанный выше метод анализа и метод Розенброка, предназначенный для нахождения экстремума функции многих переменных. Функцией цели является КПД коллектора, а варьируемыми параметрами в случае аксиально-симметричного коллектора — координаты точек начала и конца отрезков, которыми задается внутренняя конфигурация МК, значения потенциалов в этих точках, величина и распределение магнитного поля. Для неаксиально-симметричных МК варьируемыми параметрами являются смещение и наклон электродов МК, величина и распределение магнитного поля. Внутри каждого шага оптимизации совершается 11 приближений для определения собственного пространственного заряда.

Многоступенчатый коллектор — это сложная конструкция, состоящая из коническо-цилиндрических электродов с различными значениями по-

тенциалов и распределением магнитного поля. Расчет типового одноступенчатого коллектора на персональном компьютере с тактовой частотой 333 МГц занимает несколько минут при 11 приближениях. Оптимизация его даже по трем основным параметрам: потенциалу, диаметру входного отверстия и величине магнитного поля на входе — занимает часы.

Время оптимизации зависит от выбора первоначального варианта и последовательности действия метода оптимизации. Сокращение времени оптимизации возможно при использовании предлагаемой последовательности и специальной схемы.

Анализ литературы и проводимые исследования процессов в МК показывают, что первоначальными параметрами оптимизации должны быть потенциалы ступеней коллектора как наиболее влияющие на КПД МК. При выбранных потенциалах оптимизируются диаметры отверстий МК, а затем длины ступеней и распределение магнитного поля.

Временной анализ расчета МК показывает, что около 80 % общего времени затрачивается на расчет пространственного заряда (ПЗ). В коллекторе электронный поток расширяется и увеличивает свой радиус более чем в 5—10 раз. Влияние изменения ПЗ такого потока на потенциал внутри коллектора уменьшается. Предлагаемая схема оптимизации позволяет дальнейшее сокращение времени оптимизации, при которой варьирование параметров осуществляется при одном и том же ПЗ, вычисленном методом последовательных приближений для первоначального варианта. На первом этапе задается исходная конфигурация МК, выбираются варьируемые параметры, пределы их изменения и начальные шаги оптимизации, что позволяет существенно сузить область поиска оптимальных значений и сократить время счета. Одним из ограничений при оптимизации МК является величина обратного тока из коллектора.

Конфигурация МК задается координатами начала и конца отрезков прямых, вращение которых вокруг оси Z и задает внутреннюю конфигурацию МК. В этих же точках задаются и значения потенциала ступеней.

Таким образом, варьируя эти координаты и значения потенциалов в них, мы изменяем конфигурацию и потенциалы ступеней МК. Допускается оптимизация какой-то одной части МК, например радиуса входного отверстия либо всего МК, потенциала одной ступени либо всех и так далее.

Магнитное поле задается значением координат начала и конца, шагом изменения и таблицей значений магнитного поля, что позволяет варьировать

величину и положение магнитного поля относительно МК.

На втором этапе проводится расчет МК методом последовательных приближений. Пространственный заряд, вычисленный на последнем приближении, запоминается в узлах его сетки.

Далее осуществляется оптимизация МК по выбранным параметрам с одним и тем же значением ПЗ. При достижении максимального значения КПД коллектора с заданной точностью оптимизация прекращается.

На следующем этапе проводится расчет полученного МК методом анализа с учетом собственного пространственного заряда и определяется окончательное значение КПД коллектора. Если это значение отличается от полученного в результате оптимизации на величину больше заданной, то вышеприведенная процедура оптимизации проводится вновь. Полученный таким образом коллектор может служить первоначальным вариантом при оптимизации с учетом ПЗ на каждом шаге оптимизации.

По завершении оптимизации на экран монитора выводятся оптимальная конфигурация МК, потенциалы ступеней и распределение магнитного поля, а также траектории первичных и вторичных крупных частиц, токи на ступени и выделяемая на них мощность электронного потока.

Исследуемая лампа бегущей волны

Расчеты и оптимизацию МК проводили для узкополосной ЛБВ S-диапазона с основными безразмерными параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

C	Q	D	γ_{ca}	$\eta_e, \%$	Усиление, дБ
0,08	8,4	0,07	0,86	37	45

Предложенные метод и схема оптимизации были апробированы на пятиступенчатом аксиально-симметричном и двухступенчатом неаксиально-симметричном МК.

Оптимизация пятиступенчатого МК

Первоначальные конфигурации, значения потенциалов и распределения магнитного поля МК были выбраны из распределения электронов по энергиям на выходе из пространства взаимодействия и предварительных расчетов МК методом анализа (рис. 2, *a*). Результаты оптимизации представлены в табл. 2.

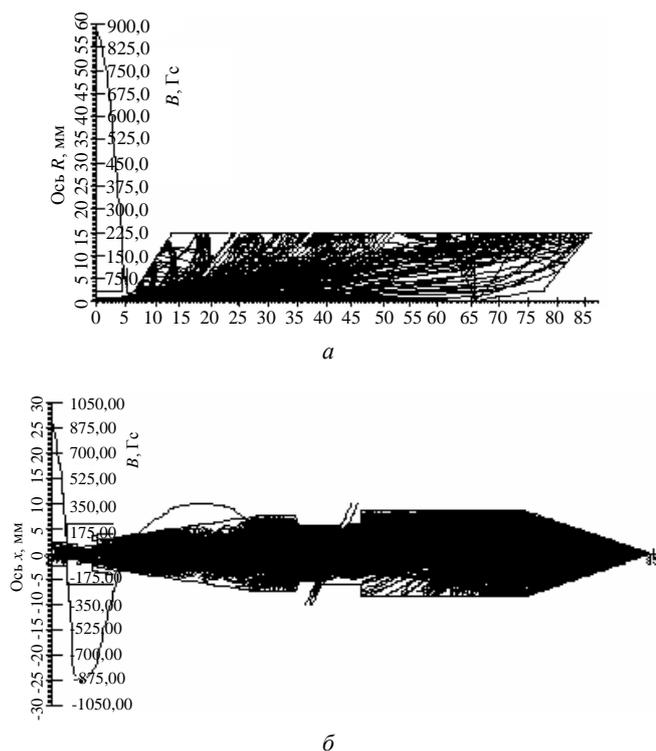


Рис. 2. Траектории первичных и вторичных крупных частиц:
 а — в пятиступенчатом коллекторе; б — в двухступенчатом коллекторе

Таблица 2

Оптимизируемые параметры, учет ПЗ	КПД кол-лектора, %	I_{rev} , %	T , мин
Анализ	66,1	0,5	4
Оптимизация V_1 с учетом ПЗ на каждом шаге	66,1	0,4	58
Оптимизация V_1 , PZ_{const}	67,7	0,4	5
r_1 с учетом ПЗ на каждом шаге	66,7	0,3	36
r_1 , PZ_{const}	66,1	0,4	4
V_2, V_3, V_4 с учетом ПЗ на каждом шаге	70,6	0,4	180
r_2, r_3, r_4 с учетом ПЗ на каждом шаге	72,1	0,4	240
$V_2, V_3, V_4, r_2, r_3, r_4, PZ_{const}$	72	0,4	84

При расчете выбранной конструкции методом анализа за 11 приближений КПД коллектора равен 66,1 % при обратном токе $-0,8$ мА. Время счета составило 4 мин.

При оптимизации потенциала первой ступени с учетом собственного ПЗ его первоначальное значение было уменьшено на 10 %. За 58 мин оптимизации КПД коллектора восстановило свое первоначальное значение, равное 66,1 %; при потенциале, отличающемся на 2 %, и обратном токе — 0,6 мА. Время оптимизации потенциала с оным и тем же ПЗ составило 5 мин, КПД коллектора равен 67,7 % при обратном токе 0,7 мА.

Оптимизация величины входного отверстия первой ступени проходила с уменьшенным с 1,7

до 1,4 мм его первоначальным значением. За 36 мин оптимизации величина отверстия стала равной первоначальному значению, КПД коллектора незначительно увеличился до 66,7 % при обратном токе 0,5 мА. Оптимизация величины отверстия с одним и тем же ПЗ завершилась за 4 мин, КПД коллектора равен 66,1 % при обратном токе 0,7 мА, однако величина отверстия уменьшилась на 16 %.

Проведенная последующая оптимизация потенциалов второй, третьей и четвертой ступеней увеличила КПД коллектора до 70,6 %, а оптимизация радиусов входных отверстий ступеней — до 72,1 %. Общее время счета оптимизации по потенциалам и отверстиям пятиступенчатого МК составило около 7 ч при учете собственного ПЗ-методом последовательных приближений на каждом шаге оптимизации. Оптимизация с одним и тем же ПЗ, вычисленном в исходном варианте МК, позволила сократить время оптимизации примерно в пять раз.

Оптимизация двухступенчатого неаксиально-симметричного коллектора

Исследуемый двухступенчатый коллектор представлен на рис. 2, б. Для уменьшения обратного потока электронов из коллектора, отраженных от второй ступени, и уменьшения тока замедляющей системы использована неаксиально-симметричная линза между первой и второй ступенями. Специально подобранное распределение магнитного поля в коллекторе позволяет подфокусировать электронный поток в первой ступени и увеличить ток второй ступени. Наиболее влияющим на КПД в таком коллекторе (кроме потенциалов ступеней) являются наклон неаксиально-симметричной линзы, распределение и величина магнитного поля в первой ступени. Результаты оптимизации представлены в табл. 3.

Таблица 3

Оптимизируемые параметры, учет ПЗ	КПД кол-лектора	I_{rev} , %	T , мин
Анализ	59,8	0,86	7
Оптимизация по величине магнитного поля	63,8	1	60
Угол наклона, град.	66	1	71

Конфигурация коллектора и потенциалы ступеней были выбраны на основе расчетов по программе анализа. КПД коллектора равен 59,8 %, при обратном токе — 1,3 мА. Варьируемыми параметрами были выбраны величина магнитного поля в коллекторе и угол наклона неаксиально-симметричной линзы. Максимальное значение магнитного поля в коллекторе уменьшилось в 1,2 раза, при этом КПД возрос до 63,8 %, обратный

ток увеличился до 1,5 мА. Время оптимизации составило 1 ч. При оптимизации угла наклона линзы его величина изменилась с 20 до 16 град, при этом КПД возрос до 66,15 %, обратный ток не изменился. Время оптимизации равно 1 ч 11 мин.

Л и т е р а т у р а

1. Пензяков В. В., Rogovin В. И. Расчет многоступенчатых коллекторных систем // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1977. Вып. 10. С. 84—91.

2. Журавлева В. Д., Rogovin В. И., Семенов С. О. Исследование неосесимметричных двухступенчатых коллекторов // Там же. 1985. Вып. 10. С.19—22.

3. Ильина Е. М., Морев С. П., Rogovin В. И., Семенов С. О., Ушеревич Б. Л. Анализ трансформации электронного сгустка в широкополосной лампе бегущей волны на основе усовершенствованной двухмерной модели // Радиотехника и электроника 1999. Т. 44. № 10. С. 1271—1274.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Optimization of multistage depressed collectors of arbitrary configuration

V. D. Zhuravleva, V. I. Rogovin, I. V. Rogovin

The Federal State Unitary Enterprise NPP “Almaz”, Saratov, Russia

The method and code of calculation and optimization for multistage depressed collectors of arbitrary configuration is described. Collector efficiency is the target function and collector dimensions, potentials of stages, magnetic field distribution, displacement and inclination of collector stages are the varied parameters.

* * *