

УДК 621.385.632

Комплекс программ для проектирования на ЭВМ электронных пушек с сеточным управлением

А. И. Петросян, В. Д. Журавлева, В. В. Пензяков, В. И. Роговин
ФГУП «НПП «Алмаз»», Саратов, Россия

Электронные пушки с сеточным управлением проектируются на основе двумерной, квазитрехмерной и трехмерной математических моделей. Вначале осуществляются расчет параметров катодно-сеточного узла (КСУ), синтез и траекторный анализ диодной пушки, в которую предполагается установить управляющую сетку. Затем проводится траекторный анализ пучка в ячейках КСУ, найденные скорости, координаты и заряды крупных частиц на выходе из ячеек используются при определении начальных данных для расчета траекторий пучка в пушке, а их значения на выходе из анода применяются при расчете магнитной фокусировки пучка. Электронно-оптические системы с пушками, спроектированными с помощью данного комплекса программ, не требуют экспериментальной доводки и обеспечивают хорошее (90—97 %) токопрохождение в приборах СВЧ.

Электронные пушки с сеточным управлением проектируются на ЭВМ на основе двумерной, квазитрехмерной и трехмерной математических моделей [1—9]. Вначале осуществляется расчет КСУ в режиме диалога с ЭВМ [2]. Задав ток пучка, ускоряющее напряжение, диаметр пролетного канала и скважность, проектировщик получает на экране ЭВМ рекомендуемое значение диаметра катода (в зависимости от допустимой плотности тока на катоде) и тип сетки (в зависимости от удельной мощности токоперехвата сетки и ее материала): токоперехватывающая или защищенная от токоперехвата теневой сеткой. Выбрав диаметр катода и тип сетки и задав ширину элементов сеток, толщину сеток, их расстояние от катода и напряжение «запирания» пушки, проектировщик получает эскиз сеток с размерами и таблицу заданных и рассчитанных параметров КСУ. Эта таблица включает в себя такие параметры как напряжения «запирания» и «превышения» (напряжение на сетке, обеспечивающее "рабочий" ток пушки), геометрическая и эффективная прозрачность сетки, диаметр катода и его радиус кривизны, расстояние между катодом и сетками, число радиальных перемычек и колец сетки радиального типа (именно ее обычно применяют в приборах СВЧ) или размер ячейки сотовой сетки и т. п.

Затем проводится синтез осесимметричной электронной пушки О-типа по программе [3]. В основу алгоритма, реализованного в программе, положен метод синтеза электронных пушек [4], основанный на уравнениях второго приближения в теории формирования электронных пучков [10, 11]. Этот метод дает возможность рассчитать электронную пушку вместе с переходной областью магнитного поля, определить параметры МПФС, найти эквипотенциальные поверхности внутри и вне пучка и учесть влияние начальных тепловых скоростей электронов на формирование пучка методом, предложен-

ным в [5]. При этом подбор оптимальной конфигурации электродов пушки, которая формирует пучок нужного диаметра и заданной структуры, происходит автоматически на основе минимизации разницы между рассчитанными и требуемыми значениями диаметра пучка в кроссовере и отношения плотностей токов на краю и в центре пучка. Минимизация производится методом градиента с контролируемой величиной шага. Полученные в результате расчета осесимметричные электроды пушки имеют криволинейные образующие, поэтому по конструктивно-технологическим соображениям их аппроксимируют набором цилиндрических и конических поверхностей.

Диодная электронная пушка, полученная методом синтеза, рассчитывается методом анализа [1, 2]. Расчет электростатического потенциала ведется в двумерном приближении методом интегральных уравнений, при котором распределение поверхностной плотности заряда на границе области определяется из решения системы линейных алгебраических уравнений, полученных в результате приравнивания вычисленных значений в точках на границе области заданным значениям. При этом особенность, возникающая при совпадении точки наблюдения с точкой истока, выделяется аналитически. Траекторный анализ пучка ведется методом крупных частиц с учетом начальных тепловых скоростей электронов. Ток пучка вычисляется по закону "трех/вторых" для сферического диода. Самосогласованная задача расчета потенциала и электронных траекторий решается методом последовательных приближений, для совпадения значений тока на двух соседних итерациях с точностью 0,1 % требуется 10—12 итераций. Исходя из размещения управляющей сетки на эквипотенциальной поверхности, определяются кривизна сетки и форма сеткодержателя.

С целью расчета азимутального возмущения пучка в двумерном приближении проводится траекторный анализ [1, 2] электронного пучка в ячейке КСУ (рис. 1, а, б). Ячейка образована радиальными перемычками теневой (если она есть) и управляющей сеток, катодом ячейки (который представляет собой заключенную между этими перемычками часть катода пушки) и эквипотенциальной поверхностью, найденной в результате расчета электронной пушки и играющей роль анода. При этом катод и анод ячейки КСУ считают плоскими (учитывая малую величину размеров этой ячейки по сравнению с радиусом кривизны катода), а пучок в ячейке — ленточным. Расчет потенциала, тока и электронных траекторий пучка ведется подобно тому, как это делается в методе анализа диодной пушки. Область расчета включает в себя одну ячейку КСУ и две половинки соседних ячеек. Потенциал на боковых границах области при очередной итерации задается таким же, каким он был рассчитан во время предыдущей итерации на линии, параллельной боковым границам и расположенной посередине между ними (и посередине ячейки). При этом процесс расчета последовательных приближений продолжается до тех пор, пока значения потенциала в точках этой линии, рассчитанные в двух соседних итерациях, не совпадут с заданной степенью точности (обычно с точностью до 0,2 %). Число крупных частиц в одной ячейке равно 250, что позволяет точно рассчитывать возмущение траекторий частиц под действием сеток. Расчет проводится с учетом влияния начальных тепловых скоро-

стей электронов. После выхода частиц из ячейки КСУ значения их зарядов и скоростей в плоскости, обычно отстоящей от сетки на ее двойную толщину, записываются для последующего использования при расчете пушки с сеткой.

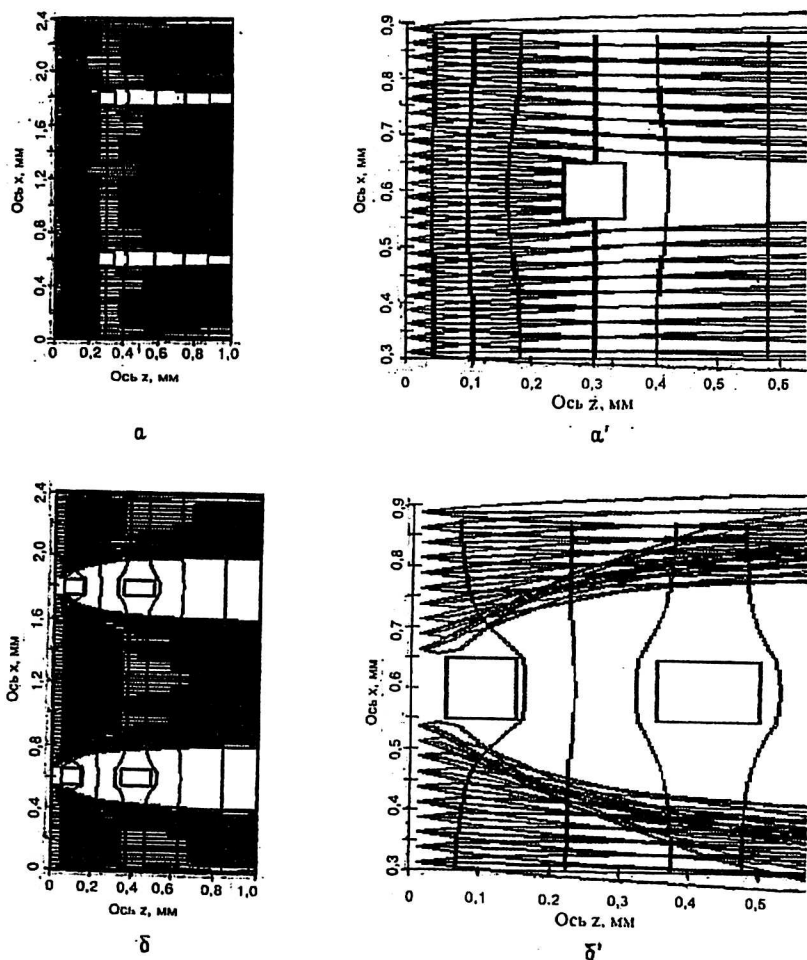


Рис. 1. Экипотенциальные поверхности и траектории крупных частиц в ячейке КСУ:
а — при естественном потенциале на токоперехватывающей управляющей сетке (ток на боковые поверхности перемычек сетки увеличивает перехват в 1,49 раза); *а'* — вблизи перемычки сетки (в увеличенном масштабе); *б* — с теневой сеткой при естественном потенциале на управляющей сетке, *б'* — вблизи перемычки сетки (в увеличенном масштабе)

Затем на основе квазитрехмерной математической модели рассчитывается электронный пучок в пушке с сеточным управлением [1, 2]. При этом подходе азимутальная зависимость потенциала в пределах ячеек КСУ учитывается в процессе описанного выше траекторного анализа ячейки КСУ, что и дает возможность получить распределение крупных частиц по азимутальным скоростям. При расчете же пушки потенциал и пространственный заряд пучка считаются осесимметричными и рассчитываются в двумерном приближении (так, как это делается в методе анализа диодной пушки). Начальные точки траекторий в электронной пушке лежат на очень малом (0,01—0,02 мм) расстоянии от катода, что позволяет учесть влияние колец теневой и управляющей сеток при расчете тока пучка, найти радиальное возмущение пучка

кольцами сеток и, в отсутствие теневой сетки, определить токооседание на кольца управляющей сетки. После пролета между кольцами управляющей сетки каждая крупная частица расщепляется на несколько частиц с разными азимутальными скоростями и зарядами в соответствии с распределением крупных частиц по азимутальным скоростям, найденным из траекторного анализа ячеек КСУ. Дальнейший расчет электронных траекторий в пушке ведется на основе решения трехмерных уравнений движения, что дает возможность учесть влияние азимутальных компонент скоростей крупных частиц на формирование пучка (это и позволяет назвать методику расчета "квазитрехмерной"). Изменение тока пучка под влиянием колец и радиальных переемычек сеток вызывает смещение эквипотенциальных поверхностей в пушке, в том числе и той поверхности, часть которой служит анодом в ячейке КСУ. Это приводит к необходимости пересчета ячейки КСУ (со смещенным анодом) и электронной пушки. Если потенциал на управляющей сетке существенно (30 % и более) отличается от естественного, то может потребоваться повторить пересчет ячейки КСУ и пушки до тех пор, пока результаты расчета пушки не совпадут с результатами ее предыдущего расчета с заданной степенью точности. При сильном отличии потенциала управляющей сетки от его естественного значения точность расчета пушки с сеткой по описанной методике снижается, что может потребовать применения "трехмерной" программы расчета пушки. Известно, однако, что электронная пушка, как правило, работает при потенциале на сетке, близком к естественному потенциалу, так как это позволяет минимизировать возмущение пучка сетками и достичь хорошего токопрохождения в приборе. Поэтому обычно для расчета пушки с сеткой вполне достаточно применить описанную программу, основанную на квазитрехмерной математической модели, а "трехмерную" программу в этом случае целесообразно использовать для точного расчета напряжения "запирания" пушки. По окончании расчета электронной пушки заряды, скорости и координаты крупных частиц на выходе из нее записываются для последующего их использования в качестве начальных данных при расчете пучка в магнитной фокусирующей системе. Примеры расчета электронных пушек приведены на рис. 2, а, б.

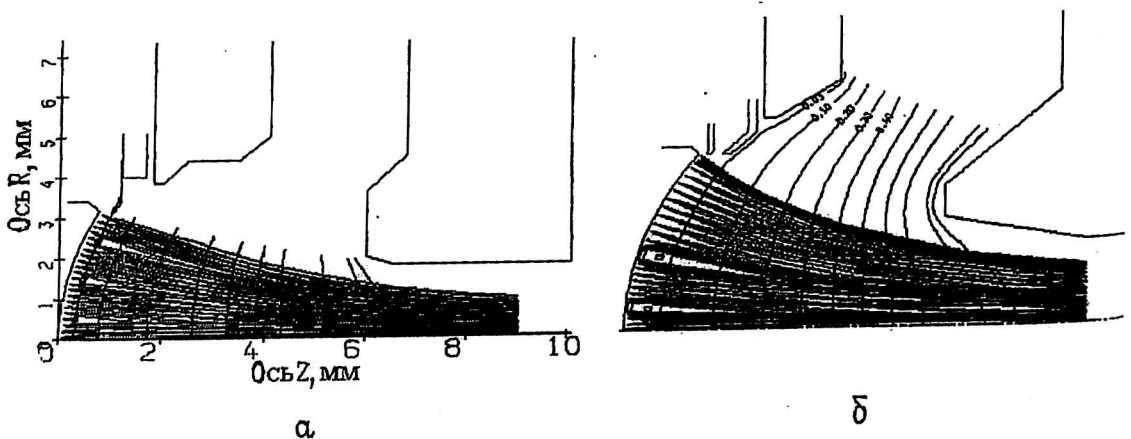


Рис. 2. Эквипотенциальные поверхности и электронные траектории в пушке с:
 а — токоперехватывающей сеткой при естественном потенциале на ней;
 б — теневой сеткой при естественном потенциале на управляющей сетке

Предусмотрена также возможность моделирования вторичной электронной эмиссии с токоперехватывающей сетки [6]. При этом моделировании каждая крупная частица, попавшая в перемычку сетки, вызывает эмиссию 7 частиц, одна из которых имитирует упругоотраженные электроны, три — неупругоотраженные электроны и три — истинно вторичные электроны (рис. 3). Углы вылета вторичных электронов, их энергия и коэффициенты вторичной эмиссии и неупругого отражения электронов определялись из [12]. Имеется также возможность моделирования и термоэлектронной эмиссии с сетки по методике, описанной в работе [7].

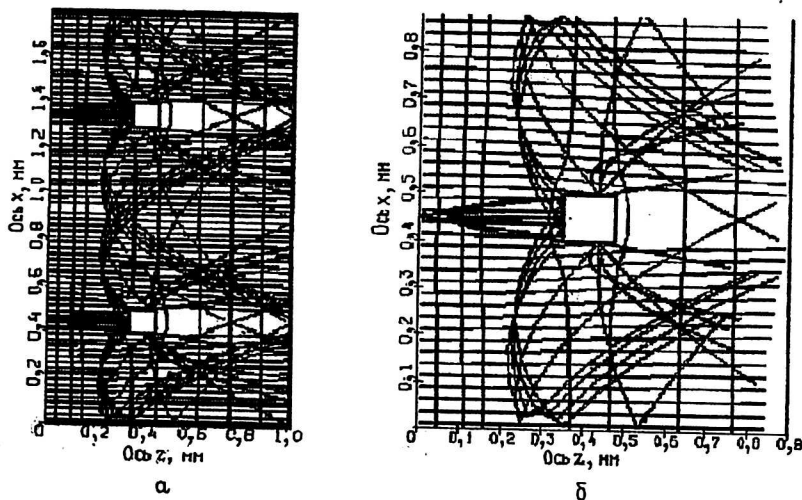


Рис. 3. Траектории электронов пучка и электронов вторичной электронной эмиссии: а — в ячейке КСУ; б — вблизи перемычки сетки (в увеличенном масштабе)

Далее на основе трехмерной математической модели ведется расчет "запирающего" пушки отрицательного напряжения на управляющей сетке [8]. Предполагается, что сетка является радиальной и состоит из набора коаксиальных колец конечной толщины, расположенных на сферической поверхности и связанных друг с другом радиальными перемычками. Для определения электростатического потенциала используется метод интегральных уравнений. Используя периодичность в азимутальном распределении потенциала (период $L = 2\pi/N$, где N — число радиальных перемычек) и симметрию потенциала относительно меридиональной полуплоскости $\varphi = (2n-1) \times \pi/N$, $n = 1, 2, \dots, N$, можно в $2 \times N$ раз уменьшить порядок решаемой системы линейных алгебраических уравнений, а расчет потенциала вести только в секторе $0 \leq \varphi \leq \pi/N$. Напряжение "запираения" пушки равно тому минимальному по абсолютной величине отрицательному потенциалу на управляющей сетке, при котором значения потенциала во всех точках над катодом на малом расстоянии от него остаются отрицательными. Если сетка не является радиальной, то ее ячейка может быть аппроксимирована ячейкой радиальной сетки при правильном выборе диаметров колец и числа радиальных перемычек. Правильность результатов расчета напряжения "запираения" подтверждена их сопоставлением с данными эксперимента.

Далее рассчитывается вольтамперная сеточная характеристика электронной пушки. Очевидно, что для строгого расчета вольтамперной сеточной характеристики требуются программы, основанные на трехмерной математической модели. Однако с достаточной для практики точностью расчет вольтамперной сеточной характеристики может быть проведен и в двумерном приближении, если воспользоваться следующей методикой. Сначала по программе [8], основанной на трехмерной математической модели, определяется величина напряжения "запирания" (для этого достаточно численно решить уравнение Лапласа, в то время как для вычисления по "трехмерной" программе вольт-амперной сеточной характеристики требуется решить гораздо более сложную задачу самосогласованного расчета потенциала и электронных траекторий). Затем реальная управляющая сетка заменяется в расчетной модели набором коаксиальных колец, расположенных на сферической поверхности сетки, и по алгоритму [9], основанному на двумерной математической модели, рассчитывается напряжение "запирания" пушки. При этом расстояния между кольцами выбираются такими, чтобы величина этого напряжения совпадала бы со значением напряжения "запирания", определенного ранее по "трехмерной" программе. Затем по программе [2] в двумерном приближении проводится расчет электронной пушки с разными значениями напряжения на этих кольцах и по результатам расчета строится вольтамперная сеточная характеристика.

В заключение отметим, что данный комплекс программ использовался в процессе разработки ряда ЛБВ с сеточным управлением. Электронно-оптические системы с пушками, спроектированными с помощью данного комплекса программ, не требуют экспериментальной доводки и обеспечивают хорошее (90—97 %) токопрохождение в приборах СВЧ.

Л и т е р а т у р а

1. *Петросян А. И.* Методика и результаты проектирования электронной пушки с сеточным управлением // Тезисы докладов X Всесоюзного семинара по методам расчета электронно-оптических систем. Академия наук СССР, Научный совет по проблеме "Физическая электроника", Минвуз УССР, Львовский университет им. И. Франко. — г. Львов, 1990. С. 102.
2. *Петросян А. И.* Проектирование на ЭВМ электронных пушек с сеточным управлением электронным пучком // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. — Саратов: Саратовский гос. техн. университет, 1998. С. 213—217.
3. *Петросян А. И., Иванова З. П., Пензяков В. В.* Программа синтеза электронных пушек О-типа // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1976. Вып. 10. С. 109—110.
4. *Пензяков В. В., Петросян А. И.* Расчет электронных пушек О-типа методом синтеза // Там же. 1972. Вып. 4. С. 36—43.
5. *Петросян А. И., Пензяков В. В.* Учет эффекта тепловых скоростей в электронных пушках О-типа, рассчитанных методом синтеза // В кн. Теория и техника электронных приборов СВЧ: Тез. докл. и рекомендации науч.-техн. конф. Сер. Электроника СВЧ. — М., 1972. Вып. 2(24). С. 29.
6. *Петросян А. И., Роговин В. И.* О влиянии фронтов импульса модулирующего напряжения и вторичной электронной эмиссии с токоперехватывающей сетки на токопрохождение в сеточных приборах СВЧ // Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ: Матер. конф. 20—24 марта, 2001. Саратов. С. 116—118.
7. *Петросян А. И., Роговин В. И.* Моделирование термоэлектронной эмиссии с управляющей токоперехватывающей сетки в электронно-оптических системах приборов СВЧ // Прикладная физика. 2002. № 3. С. 133.

8. Петросян А. И., Журавлева В. Д. Анализ электронного пучка в области катод—сетка на ЭЦВМ. Физика явлений, методы расчета и разработка электровакуумных и твердотельных приборов: Тез. докл. и рекомендаций науч.-техн. конф. Сер. Электроника СВЧ. — М., 1977. Вып. 3(81). С. 22—23.

9. Петросян А. И. Численное исследование процесса "запирания" электронной пушки с сеточным управлением // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. — Саратов: Саратовский гос. техн. университет, 2000. С. 193—197.

10. Овчаров В. Т., Пензяков В. В. Приближенное решение внутренней задачи теории формирования электронных пучков// Радиотехника и электроника, 1970. Т. 15. Вып. 8. С. 1651—1658.

11. Овчаров В. Т., Пензяков В. В. Приближенное решение внешней задачи теории формирования электронных пучков// Там же. Вып. 9. С. 1897—1902.

12. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. — М.: Наука, 1969.

Complex of the programs for computer-aided design of the electron guns with grid control

A. I. Petrosyan, V. D. Juravleva, V. V. Penzyakov, V. I. Rogovin
The federal state unitary enterprise «NPP "Almaz"», Saratov, Russia

The computer-aided design of "gridded" electron guns is conducted on the base of two, two and half and three-dimensional mathematical models. The parameters of cathode-grid assembly (CGA) are calculated, synthesis and the trajectory analysis of a diode gun are carried out. The trajectory analysis of beam in CGA cells is realized, the coordinates, velocities and charges of large particles on an exit from CGA cells serve the initial data for solving beam motion equations in the gun and further in magnet focusing system. Electron-optical systems, designed through the complex of programs, ensure good (90—97 %) current permeability in microwave tubes.