

УДК 621.385.632

## Расчет характеристик интенсивного электронного пучка в лампах бегущей волны

Ю. Ф. Конторин, В. И. Роговин, И. В. Роговин

*Приведены результаты расчета интенсивных электронных пучков в пространстве взаимодействия и в многоступенчатом коллекторе лампы бегущей волны (ЛБВ) по комплексу взаимосвязанных программ. Отличительной особенностью комплекса является модель многоскоростного по поперечным составляющим скорости электронного потока в пространстве взаимодействия и определение огибающих электронного пучка, содержащих заданный процент тока. Проведено сопоставление расчетных и экспериментально измеренных характеристик электронного пучка в ЛБВ.*

PACS: 41.75.-i

*Ключевые слова:* лампа бегущей волны, электронный пучок, расчет, эксперимент.

### Введение

Лампа бегущей волны остается на сегодня наиболее востребованным СВЧ-усилителем для систем связи, навигации, локации и других специальных применений. Она является активным элементом радиоэлектронных систем и определяет их тактико-технические характеристики. Большой успех в улучшении выходных параметров ЛБВ связан с созданием современных программ расчета основных функциональных узлов [1]. Важнейшим инструментом становится комплекс программ, основанный на двухмерных моделях, взаимосвязанных по входу и выходу.

Повышение КПД приводит к необходимости, наряду с хорошо зарекомендовавшей себя одномерной нелинейной моделью, использования программ расчета, основанных на двухмерных моделях. Это позволяет уточнить выходные характеристики ЛБВ, определить токооседание на замедляющую систему, использовать средства, уменьшающие динамическую расфокусировку, и получить данные для теплового расчета замедляющей системы и электронно-оптического расчета коллектора. Для получения начальных данных об электронном пучке двухмерная программа расчета пространства взаимодействия состыкована с программой электронно-оптического расчета пушки, либо используется вспомогательная программа для имитации многоскоростного по поперечным скоростям электронного пучка.

Отличительными особенностями применяемого двухмерного комплекса являются: использование метода интегральных уравнений для решения уравнений Лапласа и Пуассона в пушке и коллекторе; модели многоскоростного по поперечным скоростям электронного потока от катода до коллектора; определение огибающих электронного пучка, содержащих заданный процент тока, учета вторичной эмиссии первой и второй генераций в коллекторе; использование методов оптимизации для определения параметров многоступенчатого осе- и неосесимметричного коллектора.

Исследованию влияния двухмерных эффектов на работу ЛБВ посвящено довольно большое число работ, [2—4]. Получено приемлемое соответствие рассчитанных и экспериментально измеренных выходных характеристик. Расчет динамической расфокусировки пучка в реальных магнитных полях, которые обычно превышают бриллюэновское значение в 1,5—2 раза, приводит к пульсациям границы пучка, которые не наблюдаются экспериментально. В работе [5] для устранения этих пульсаций используется модель многоскоростного электронного пучка [6], учитывающая поперечные составляющие скорости электронов. Возможность приближенного расчета динамической расфокусировки пучка в области взаимодействия на основе двухмерной дисковой модели, учитывающей разброс поперечных скоростей, показана в работе [7]. Многоскоростная модель пучка описана в параксиальном приближении уравнением для его огибающей. Однако в реальных ЛБВ при стартовом заполнении пучком пролетного канала, равном 0,5, при динамической расфокусировке диаметр пучка увеличивается более чем в 2 раза, и наблюдаются значительные пульсации его границы, что говорит о его непараксиальности.

**Конторин Юрий Федорович**, ведущий инженер.  
**Роговин Владимир Игоревич**, зам. директора.  
**Роговин Игорь Владимирович**, начальник сектора.  
Научно-производственное предприятие "Алмаз".  
Россия, 410033, г. Саратов, ул. Панфилова, 1.  
E-mail:almaz@overta.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2010 г.

В предлагаемой работе проведены теоретические и экспериментальные исследования выходных параметров и динамической расфокусировки на основе двухмерной дисково-кольцевой модели, учитывающей разброс поперечных скоростей электронов. Проведено сопоставление расчетных характеристик пучка в статическом режиме с экспериментально измеренными в пространстве взаимодействия. Определены характеристики пучка на выходе из ЛБВ в динамическом режиме. Двухмерная структура пучка преобразована в трехмерную, и проведен расчет двухступенчатого неосесимметричного коллектора. Исследования выполнены для широкополосной ЛБВ с полосой 77 % в X- и Ku-диапазоне.

### Двухмерная дисково-кольцевая модель пучка

Для исследований использовалась усовершенствованная программа расчета [5], основанная на двухмерной дисково-кольцевой модели взаимодействия электронного потока с волной в ЛБВ [8]. Пучок симметричный и разбит по сечению на ряд концентрических слоев — трубок тока. Средний

радиус слоя  $R_n$ , продольная и поперечная скорости  $W_{zn}$ ,  $W_{rn}$ , соответственно, и ток  $I_n$  определяют частицу (рис. 1, а). Пучок задается числом частиц  $N$ . В процессе счета  $R_n$ ,  $W_{zn}$ ,  $W_{rn}$  образуют траектории. Если есть токооседание, то по длине уменьшается  $N$  (и полный ток пучка). В конце счета на заданной длине частицы записываются в файл данных для расчета коллектора.

Отличительной особенностью двухмерной модели является учет влияния поперечных скоростей электронов. В программу были внесены некоторые дополнения.

В соответствии с используемой многоскоростной моделью пучка в каждой точке разбиения пучка (рис. 1, б) по радиусу  $R_i$  задается слой, имеющий преимущественный угол наклона к оси, и несколько слоев, отстоящих на плюс-минус  $\Delta R_i$  с различными углами наклона к оси, имеющими разные знаки относительно преимущественного угла. Как показали проведенные расчеты, такое задание позволило уменьшить пульсации границы пучка. Введение произвольного задания периода и амплитуды магнитного поля по длине пространства взаимодействия позволило реализовать любые законы их изменения.

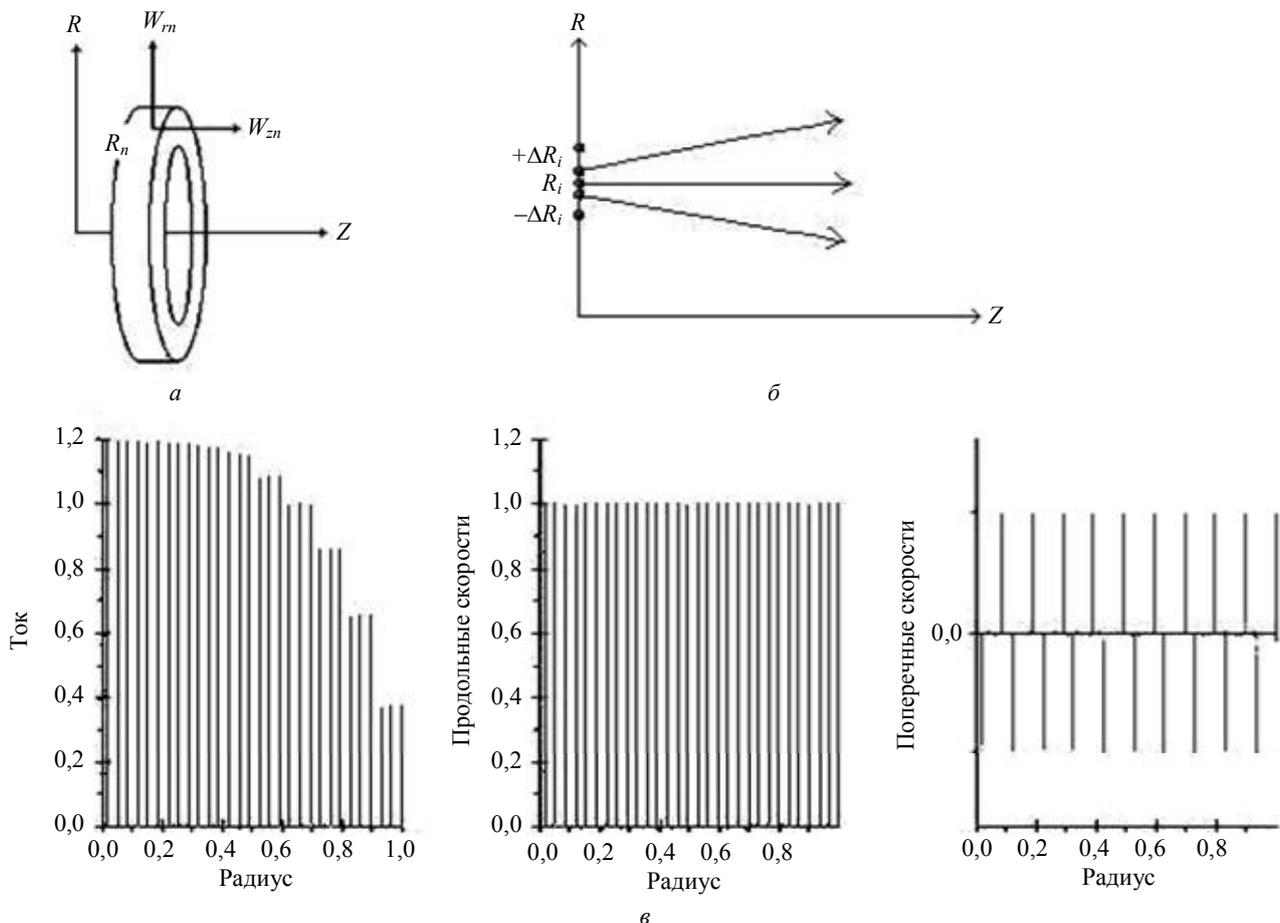


Рис. 1. Характеристики пучка на входе в ЛБВ для расчета по двухмерной программе взаимодействия:

а — "крупная" частица в форме кольца; б — разброс поперечных составляющих скорости;

в — ток, продольные и поперечные скорости

Для определения точности счета электронного пучка по двухмерной модели методом диафрагмы с малым отверстием (рис. 2) [9] проведено сопоставление рассчитанных и экспериментально измеренных огибающих электронного пучка в ЛБВ, содержащих 100, 80 и 60 % общего тока. Исследования проводились для широкополосной ЛБВ X- и Ku-диапазона с мгновенной полосой частот 77 % и следующими безразмерными параметрами:  $C = 0,072$ ;  $q = 1,13$ ;  $d = 0,073$ ;  $\gamma_{ea} = 1,19$ . Данные представлены для средней частоты. Фокусировка осуществлялась МПФС с амплитудой индукции реального магнитного поля  $B_0 = 0,27$  Тл (бриллюэновское значение  $B_0 = 0,2070$  Тл), микропереванс электронного пучка равен 0,46 при ускоряющем напряжении 4000 В.

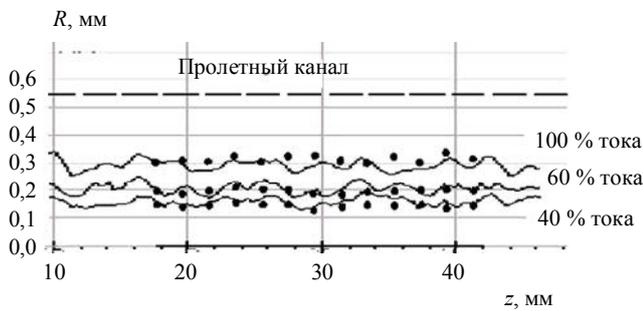


Рис. 2. Огибающие электронного пучка в ЛБВ, содержащие 100, 80 и 60 % общего тока в статическом режиме ( $P_{ax} = 0$ ):  
• — эксперимент; — — — расчет

Сравнение результатов проводилось на длине 25 мм пространства взаимодействия. Экспериментально измеренная граница пучка, содержащая 100 % тока, имеет средний радиус на 13 % больше, чем расчетная, а граница, содержащая 60 % тока, имеет меньший средний радиус на 11 %, чем расчетная. Наблюдается несколько большая волнистость расчетного пучка. Среднее расчетное заполнение пучком пролетного канала равно 0,5.

Однако для практики наблюдаемые отличия не существенны и не должны привести к отличиям в выходной мощности в динамическом диапазоне.

В динамическом режиме огибающая электронного пучка, содержащая 100 % тока, существенно увеличивает свою радиальную координату. Однако максимальное значение составляет 0,88 от диаметра пролетного канала, что позволяет электронному пучку не оседать на замедляющую систему. Электронный КПД составляет 12,5 %.

### Расчет коллектора

Полученные характеристики пучка на выходе из пространства взаимодействия (рис. 3), такие как распределение тока, продольная скорость, поперечные скорости используются для расчета аксиально-симметричных многоступенчатых коллекторов. Они усредняются по фазам влета и расчет проводится в стационарном режиме для многоскоростного по продольным и поперечным составляющим скорости в ЛБВ.

Для расчета неосесимметричного коллектора в координатах (XYZ) необходимо провести преобразование аксиально-симметричного двухмерного пучка в координатах (RZ) в трехмерный в координатах (XYZ). Предложена модель трехмерного пучка (рис. 4), в которой крупные частицы, имитирующие электронный поток, задаются по лучам, выходящим из центра пучка через 360/M градусов, где M — число лучей. В этом случае преобразование заключается в дублировании выходных данных по азимуту с луча  $\Phi = 0$  на последующие лучи  $\Phi_m$ , выходящие из центра пучка с равными интервалами. Данные затем пересчитываются в координаты плоскости (X,Y). Полное число частиц будет NM, где N — число частиц в аксиально-симметричном случае, а M — число лучей. Полный ток пучка сохраняется, так как ток каждой частицы уменьшен

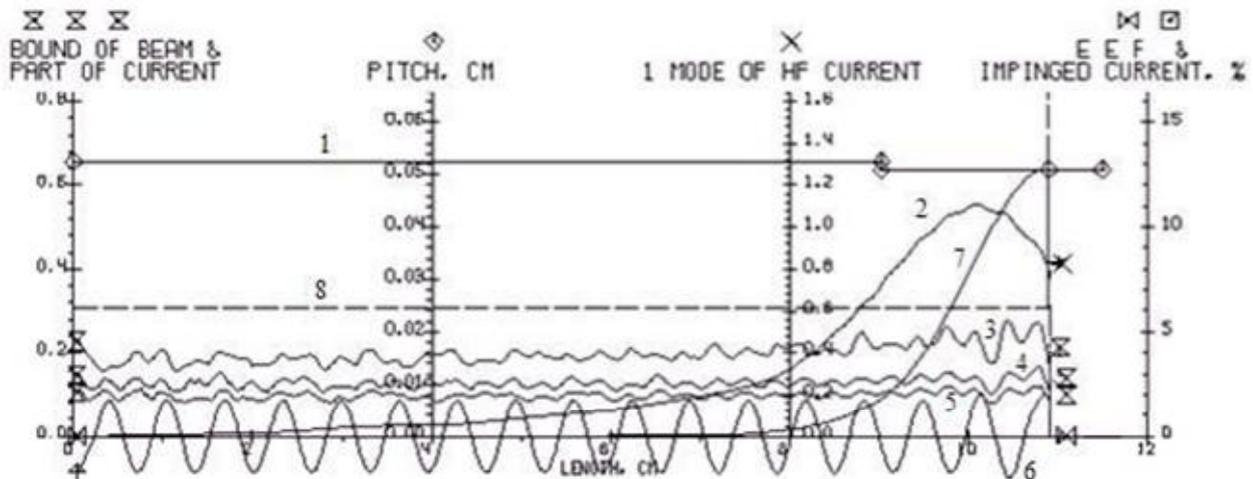


Рис. 3. Выходные характеристики ЛБВ по длине пространства взаимодействия в динамическом режиме:  
1 — шаг спирали; 2 — 1-я гармоника ВЧ-тока; 3—5 — огибающие пучка, содержащие 100, 80 и 60 % тока;  
6 — распределение магнитного поля; 7 — электронный КПД; 8 — пролетный канал

в NM раз. Этот вариант позволяет задать в M раз больше частиц, чем получено по программе расчета пространства взаимодействия.

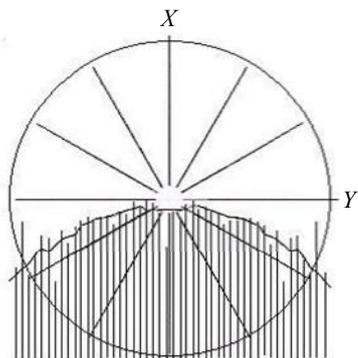
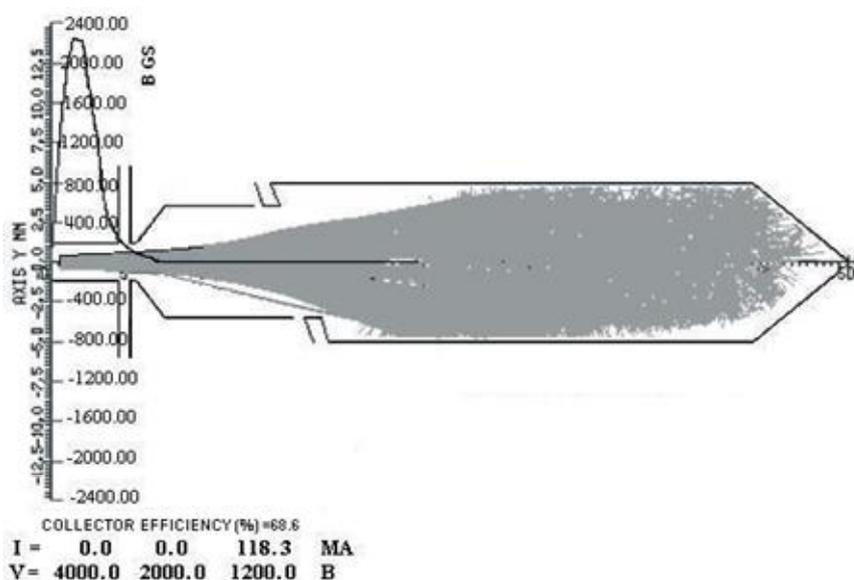


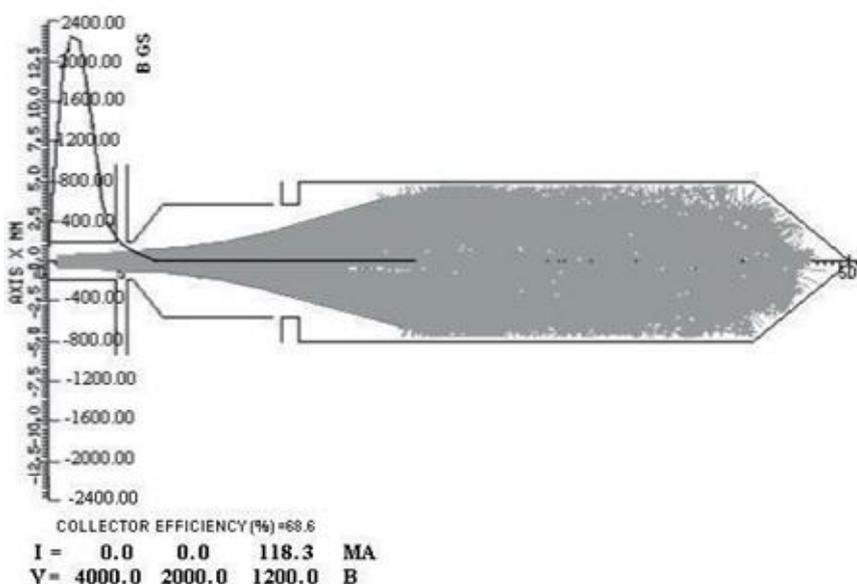
Рис 4. Модель трехмерного пучка в плоскости X, Y при  $Z = 0$  и распределение тока по поперечному сечению

Полученные таким образом характеристики пучка в трехмерной системе координат используются для расчета и оптимизации характеристик многоступенчатых неосесимметричных коллекторов [10].

В статическом режиме (рис. 5) электронный пучок оседает во второй ступени коллектора, а вторичные электроны подавляются пространственным зарядом первичного пучка. Обратный поток электронов из коллектора отсутствует. В динамическом режиме многоскоростной пучок распределяется между ступенями коллектора, имеющими разные потенциалы, появляется обратный поток отраженных электронов из коллектора, составляющий 2 % общего тока, КПД увеличивается в 3 раза.



a



б

Рис. 5. Расчет неосесимметричного двухступенчатого коллектора в статическом режиме: а — проекция YZ; б — проекция XZ

### Заключение

Проведено сопоставление расчетных по двумерной модели ЛБВ в статическом режиме и экспериментальных измерений огибающих электронного пучка, содержащих различный процент тока в пролетном канале ЛБВ.

Полученные характеристики электронного пучка на выходе из пространства взаимодействия преобразованы в трехмерный массив и использованы для расчета двухступенчатого неосесимметричного коллектора.

### Литература

1. Журавлева В. Д., Ильина Е. М., Конторин Ю. Ф. и др.// Радиотехника. 2001. № 2. С. 34.

2. Голеницкий И. И., Захарова А. Н., Хомич В. Б.// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. Вып. 3. С. 3.
3. Солнцев В. А., Ведякина К. А., Семина Т. С.// Там же. 1977. Вып. 1. С. 3.
4. Алямовский И. В.// Там же. Вып. 6. С. 53.
5. Ильина Е. М., Морев С. П., Роговин В. И. и др.// РЭ. 1999. Т. 44. № 10. С. 1271.
6. Журавлева В. Д., Морев С. П., Пензяков В. В., Роговин В. И.// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. Вып. 7(421). С. 39.
7. Морев С. П., Филатов В. А.// РЭ. 2002. Т. 47. № 4. С. 1.
8. Манькин И. А., Ушерович Б. Л.// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. № 6. С. 36.
9. Петросян А. И., Роговин В. И., Юдин Г. Ю.// Актуальные проблемы электронного приборостроения. Матер. Междунар. науч.-техн. конф. — Саратов: СГТУ. 2008. С. 74.
10. Журавлева В. Д., Роговин В. И., Роговин И. В.// Прикладная физика. 2008. № 5. С. 89—93.

## Calculation of characteristics of an intensive electron beam in TWT

*Yu. F. Kontorin, V. I. Rogovin, I. V. Rogovin*  
 Almaz R&P Association, 1 Panfilov str., Saratov, 410013, Russia  
 E-mail: almaz@overta.ru

*Outcomes of calculation of intensive electron beams in an interaction space and multi-stage collector of TWT on a complex of interdependent programs are given. The distinctive feature of a complex is the model of multiple-speed flow on transverse constituents of speed in an interaction space and definition of envelopes of an electron beam containing the given percent of a current. The comparison of numerically and experimentally measured features of electronic beam in TWT is given.*

PACS: 41.75.-i

*Keywords:* traveling-wave tube, electron beam, calculation, experiment.

Bibliography — 10 references.

*Received November 18, 2010*

\* \* \*