

УДК 621.385.6

## Исследование характеристик высокоперевансных электронно-оптических систем

А. И. Петросян, В. И. Роговин, С. О. Семенов

*Представлены результаты численного трехмерного моделирования электронно-оптических систем для ряда мощных импульсных ЛБВ, формирующих однолучевые электронные потоки цилиндрической формы с микроперевансом 3—8 мкА/В<sup>3/2</sup>. Предложены пути улучшения характеристик электронных пушек с тремя сетками и ЭОС в целом, позволившие увеличить на 8—15 % общий ток пучка, улучшить его фокусировку и в 3—4 раза уменьшить токооседание на стенки пролетного канала.*

PACS: 41.75.-i

*Ключевые слова:* электронно-оптическая система, высокоперевансный электронный пучок, низковольтное сеточное управление.

### Введение

Импульсные лампы бегущей волны (ЛБВ) нашли широкое применение в радиолокации. Одно из преимуществ таких ламп связано с низковольтным управлением мощным электронным потоком, которое обеспечивается применением управляющих сеток, расположенных около катода [1]. Обычно в мощных приборах используются две сетки: теньевая и управляющая. Величина микропереванса формируемых такими пушками электронных пучков из-за влияния анодного отверстия не превышает 1—2 мкА/В<sup>3/2</sup>.

В работах [2, 3] была предложена конструкция разработанной экспериментальным путем электронной пушки, в которой используется катод тороидальной формы и три сетки: теньевая, управляющая и анодная. Применение анодной сетки позволяет устранить влияние анодного отверстия, а тороидальная форма катода обеспечивает сходимость пучка. Пушки такого типа формируют электронный поток с микроперевансом 3—8 мкА/В<sup>3/2</sup>. Электронно-оптические системы (ЭОС) с такими пушками и фокусировкой пучка магнитным полем фокусирующей системы (МПФС) в дальнейшем успешно использовалась в ряде серийно выпускаемых широкополосных ЛБВ дм-диапазона [4], причем размеры применяемых пушек и ЭОС в целом были получены из первоначальной конструкции путем масштабирования.

**Петросян Александр Иванович**, ведущий научный сотрудник.

**Роговин Владимир Игоревич**, зам. директора.

**Семенов Сергей Олегович**, начальник сектора.  
ОАО «НПП "Алмаз"».

Россия, 410033, г. Саратов, ул. Панфилова, 1.

Тел. 8 (8452) 47-97-03. E-mail: Almaz@overta.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.

Цель настоящей работы — изучение особенностей формирования электронного пучка в высокоперевансных электронных пушках с тремя сетками и в области пролетного канала и поиск путей улучшения их характеристик.

### Результаты расчетов и экспериментальных исследований

Расчеты характеристик пушек и ЭОС проводились по трехмерной программе [5]. Исследовались электронные пушки с диаметрами катодов 28, 14 и 7 мм. Так как во всех пушках все три сетки имели по 12 радиальных перемычек, по методике [5] рассчитывался или один сектор с азимутальным углом 30° или несколько секторов. При расчете учитывались начальные тепловые скорости электронов на катоде.

Рассмотрим результаты расчетов характеристик электронной пушки с диаметром катода 7 мм (рис. 1). Из-за большого расстояния между катодом и управляющей сеткой эта сетка имеет большое значение естественного потенциала (около 17 %  $U_a$ ). В рабочих режимах потенциал управляющей сетки имеет значение меньше естественного, поэтому совместно с теньевой сеткой под потенциалом катода управляющая сетка создает для парциального пучка с каждого сектора катода фокусирующую линзу. Под ее действием и за счет кривизны поверхности катода электроны с верхней части катода фокусируются к оси пушки и за анодной сеткой образуют внутреннюю часть пучка, а электроны с внутренней части катода — внешнюю часть пучка. Радиальное электрическое поле между осевым выступом управляющей сетки и анодом уменьшает угол наклона траекторий внутренних электронов к оси пушки. Сфокусированный парциальный пучок каждого сектора пушки проходит в ячейку анодной сетки практически без оседания.

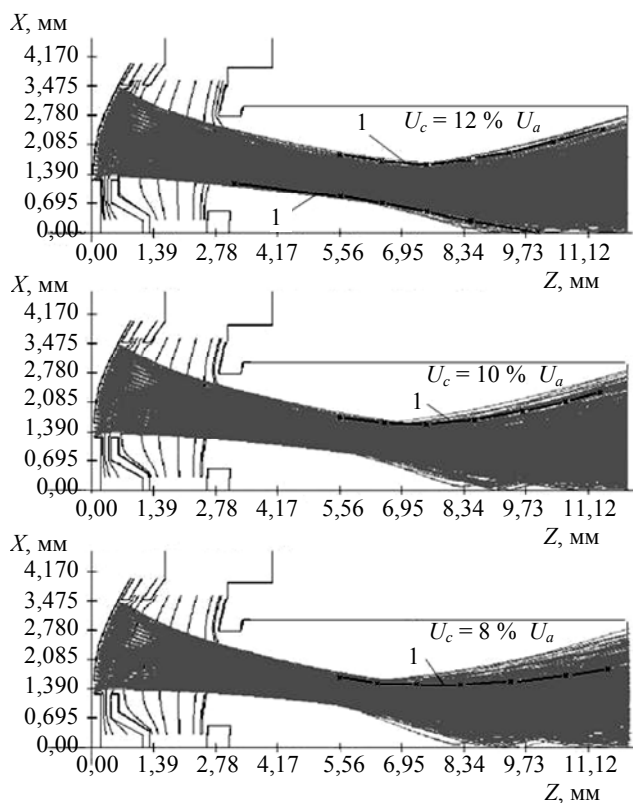


Рис. 1. Проекция траекторий частиц в электронной пушке с диаметром катода 7 мм на плоскость XZ.  $U_a = 4$  кВ. 1 — измеренная граница пучка

При расчетах пушек характеристики пучка от одного сектора за анодной сеткой записывались в файл, транслировались в азимутальном направлении по числу секторов пушки и далее использовались для расчетов движения пучка в области дрейфа за анодом пушки и далее в области пролетного канала.

Из-за ограничений на тепловой режим измерительного зонда экспериментальные измерения характеристик пучка методом диафрагмы с малым отверстием проводились при ускоряющем напряжении 4 кВ. Поэтому и траектории крупных частиц в пушке (см. рис. 1) рассчитаны при этом же напряжении.

Экспериментальные исследования характеристик электронной пушки проведены Г. А. Рехеном.

Сравнение результатов расчетов с измеренными данными о внутренней и внешней границах электронного пучка показывает их хорошее соответствие.

Еще одной особенностью сформированных пушкой с тремя сетками высокоперевансных электронных пучков является очень слабая зависимость распределений тока по радиальным и азимутальным углам наклона траекторий электронов в кроссовере пучка от потенциала управляющей сетки (см. ниже), причем интервал изменения углов в азимутальном направлении превышает интервал изменения углов в радиальном направле-

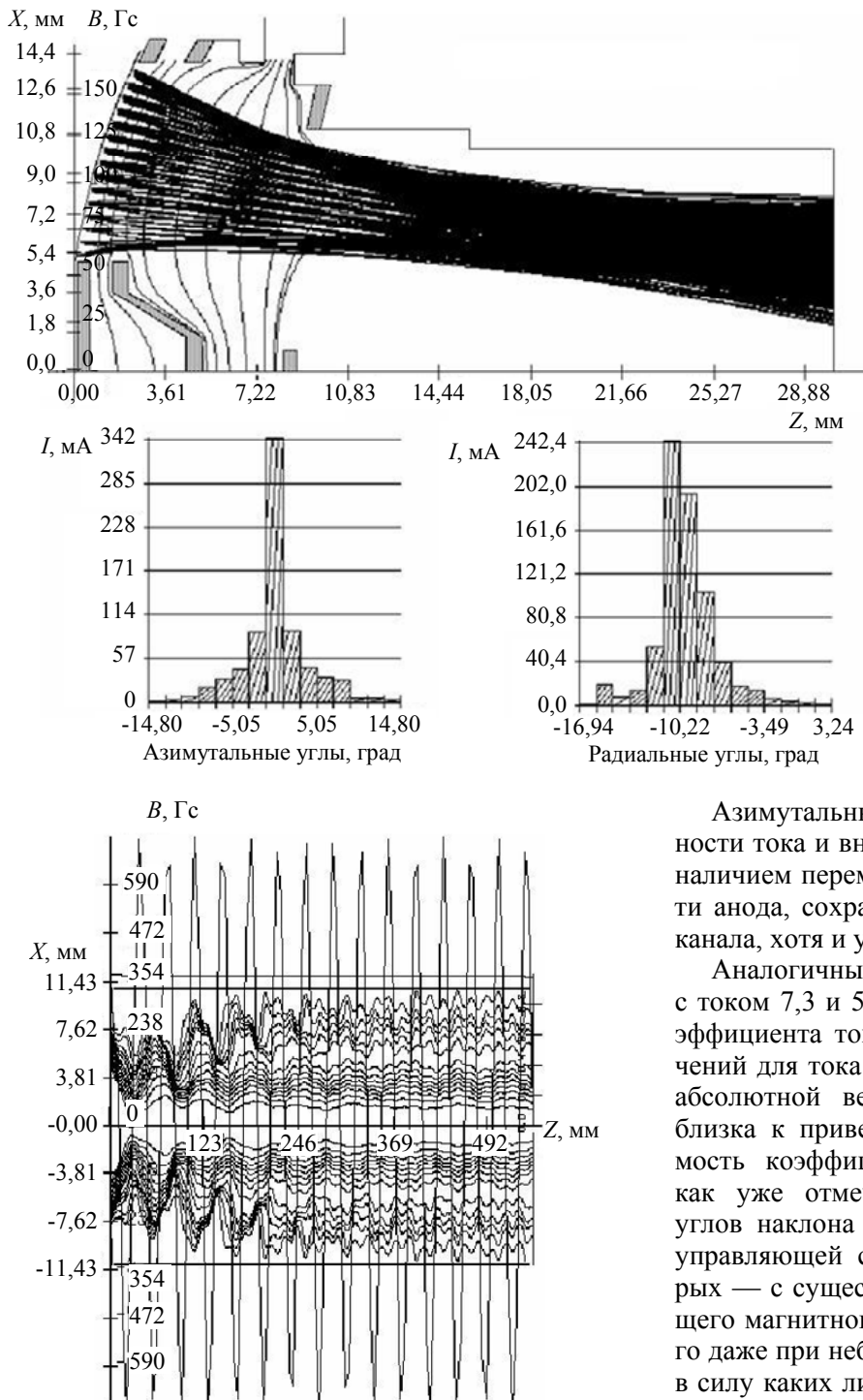
нии. Это можно объяснить применением в рассмотренной пушке сеток с только радиальными перемычками, что хорошо согласуется с приведенным в [6] анализом распределения частиц по углам наклона в трехмерной ячейке сетки.

Потенциал управляющей сетки, % $U_a$	6	8	10	12
Радиальные углы наклона, град	+ 8,04 - 19,89	+ 5,55 - 19,88	+ 6,43 - 18,89	+ 12,38 - 15,44
Азимутальные углы наклона, град	± 18,21	± 16,57	± 17,55	± 17,93

Рассмотрим характеристики электронного пучка, сформированного электронной пушкой с диаметром катода 28 мм. Рассчитывались секторы пушки с углами между ограничивающими радиальными плоскостями 30 и 90°. Сравнение характеристик сформированных пучков показало лишь незначительные отличия. При общем токе катода 8,66 А ( $P_\mu \cong 4$  мкА/В<sup>3/2</sup>,  $U_a = 18$  кВ,  $U_c = 900$  В), представленной на рис. 2 электронной пушки, кроссовер пучка расположен в области, где пучок остается еще полым. Внешний радиус пучка равен 7,86 мм, внутренний — 3,44 мм. Распределение тока пучка по углам наклона траекторий частиц показывает, что в области кроссовера пучка ( $Z = 24,8$  мм) основная часть тока пучка имеет отрицательные радиальные угла наклона, т. е. продолжает сходиться. Сформированные каждой ячейкой теневой и управляющей сеток электронные пучки сходятся не только к оси пушки, но и в азимутальном направлении. При указанном токе пучки достигают минимального в азимутальном направлении размера в области  $Z = 9,5—12$  мм. Далее происходит уменьшение радиальных размеров пучков и увеличение их азимутальных размеров. На длине  $Z = 22$  мм от катода отдельные пучки начинают сливаться, причем пучок превращается в трубчатый с сохранением небольших азимутальных вариаций плотности тока и внешнего радиуса пучка.

Проведем анализ характеристик пучка в области пролетного канала при его фокусировке МПФС. Магнитное поле проникает в область пушки примерно до анодной сетки. МПФС при периоде  $L = 36$  мм имеет амплитуду продольной составляющей на оси системы 370 Гс, причем особенностью конструкции ЛБВ и МПФС является малое значение отношения периода МПФС к диаметру пролетного канала (соответственно, 36 и 22 мм) и, как следствие, существенное увеличение магнитного поля при удалении от оси. Например, на радиусе пролетного канала  $R_k = 11$  мм величина продольной составляющей поля равна 787 Гс. Без учета указанного радиального изменения про-

дольной составляющей магнитного поля расчетный коэффициент токопрохождения пучка через пролетный канал длиной 550 мм составил всего 57,2 %, а с учетом — 92,7 % (рис. 3). При величине продольной составляющей магнитного поля 700 Гс, постоянной по сечению пролетного канала, расчетный коэффициент токопрохождения увеличился до 96,8 %.



**Рис. 3. Распределение продольной составляющей магнитного поля МПФС в области пролетного канала и границы трубок тока, содержащих следующие доли тока катода: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,93; 0,95; 0,97; 0,99**

Распределение плотности тока по поперечному сечению пучка слабо изменяется по длине пролетного канала, причем интервал углов наклона траекторий частиц в пролетном канале в присутствии магнитного заметно больше, чем в кроссовере пучка без магнитного поля. Ток частиц с большими углами наклона относительно невелик, и эти частицы образуют ореол вокруг основной части пучка.

**Рис. 2. Проекция траекторий частиц в электронной пушке с диаметром катода 28 мм на плоскость XZ и распределение тока частиц по азимутальным и радиальным углам наклона в кроссовере пучка**

Азимутальные вариации распределения плотности тока и внешней границы пучка, связанные с наличием перемычек сеток и отмеченные в области анода, сохраняются по всей длине пролетного канала, хотя и уменьшаются по величине.

Аналогичные расчеты, проведенные для пучков с током 7,3 и 5,2 А, показали, что и величина коэффициента токопрохождения отличается от значений для тока 8,66 А не более чем на 1—2 % по абсолютной величине, а конфигурация пучков близка к приведенной на рис. 3. Слабая зависимость коэффициента токопрохождения связана, как уже отмечалось, со слабой зависимостью углов наклона траекторий частиц от потенциала управляющей сетки, т. е. тока пучка, и во вторых — с существенным увеличением фокусирующего магнитного поля по радиусу пучка, из-за чего даже при небольшом увеличении радиуса пучка в силу каких либо причин граничные частицы попадают в существенно большее фокусирующее магнитное поле, препятствующее значительному увеличению радиуса пучка.

Все рассмотренные выше электронные пушки с тремя сетками имели управляющую сетку с вы-

ступом в центральной части сетки, обращенном к аноду пушки, который в области между управляющей и анодной сетками создает радиальное расфокусирующее электрическое поле. Расчеты электронной пушки с сеткой без выступа показали, что без экранирующего действия выступа ток пучка в том же режиме по напряжениям электродов, что и для пушки на рис. 2, увеличился на 2,8 %, а именно, до 8,9 А. При этом внешний радиус полого пучка в кроссовере почти не изменился, т. е.  $R_k = 7,73$  мм, а внутренний радиус уменьшился почти на 29 %, т. е. до 2,45 мм. Таким образом, увеличился угол сходимости внутренней границы пучка, причем распределения тока пучка по азимутальным и радиальным углам наклона в кроссовере пучка изменились незначительно.

Расчетные вольт-амперные характеристики всех трех пушек хорошо совпадают с измеренными. Максимальное их отличие в величинах тока катода и запирающих напряжений во всем интервале значений потенциалов управляющих сеток не превышает 6,7 %.

### Улучшение характеристик высокоперевансных ЭОС

В рассмотренных конструкциях электронных пушек, имеющих три сетки, центральные части теневой и управляющей сеток закрывают центральную часть катода и эмиссии электронов с этой части катода, имеющей диаметр примерно равный радиусу пролетного канала, не происходит. Кроме того, конусный выступ управляющей сетки создает радиальное расфокусирующее электрическое поле и способствует малому изменению радиальной координаты внутренней границы пуч-

ка в промежутке между управляющей и анодной сетками и на выходе из анодной сетки траектории электронов внутренней границы пучка имеют малые углы наклона. Радиус внутренней границы полого пучка в области анодной сетки примерно равен половине радиуса пролетного канала.

За анодной сеткой пушки электронный пучок преобразовывается из полого в сплошной, причем электроны внутренней границы полого пучка приобретают существенные по величине радиальные скорости, направленные к оси пушки, в результате чего в сплошном пучке часть электронов имеет большие радиальные скорости, что затрудняет фокусировку пучка в пролетном канале.

Одним из исследованных способов улучшения характеристик пушек с тремя сетками является введение в центральную часть катода дополнительной эмитирующей поверхности и изменение конструкции трех сеток [7]. Теневая, управляющая и анодная сетки так же, как и раньше, имеют радиальные перемычки и кольцевую перемычку, образующую центральную ячейку сеток. В конструкциях электронных пушек с плоскими (рис. 4) или сферическими дополнительными эмитирующими поверхностями при тех же напряжениях на электродах общий ток пучка увеличивается до 9,98 и 9,82 А, соответственно, т. е. на 13—15 % относительно существующей конструкции пушки (см. рис. 2). Расчетный коэффициент токопрохождения пучков в МПФС той же конструкции составил 97,6 и 98,3 % (рис. 5). На стенки пролетного канала оседает 2,4 и 1,7 % тока пучка, что в 3 и 4,3 раза меньше, чем оседание в существующей ЭОС на уровне 7,3 % (см. рис. 3).

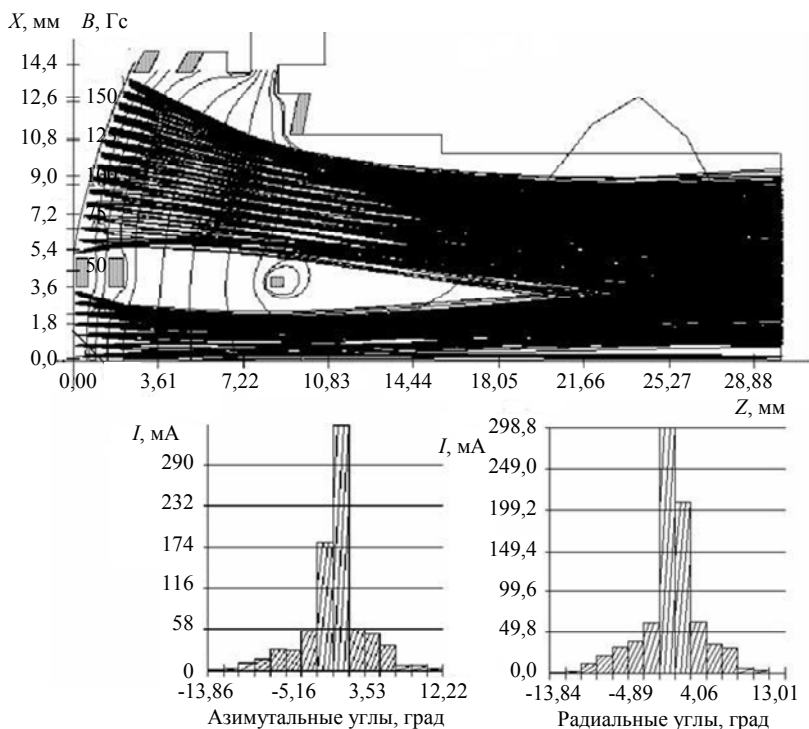


Рис. 4. Конфигурация электродов электронной пушки с дополнительной плоской эмитирующей поверхностью, проекции траекторий крупных частиц на плоскость XZ и распределение тока частиц по азимутальным и радиальным углам наклона в кроссовере пучка

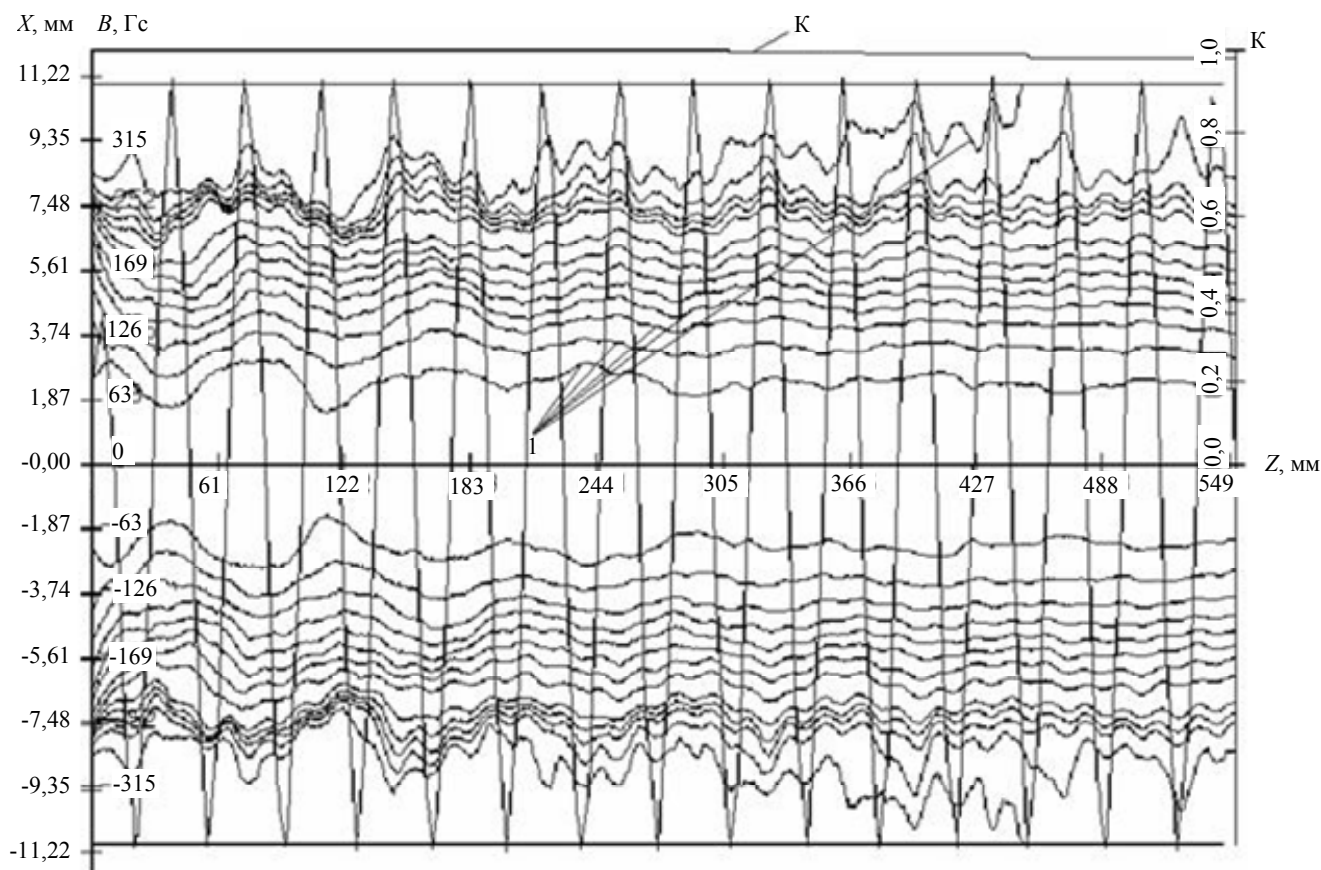


Рис. 5. Распределение продольной составляющей магнитного поля МПФС в области пролетного канала и границы трубок тока, содержащих следующие доли тока катода: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,93; 0,95; 0,97; 0,99 для электронной пушки с плоской дополнительной эмитирующей поверхностью.  
K — коэффициент токопреобразования

Величина запирающего напряжения почти не изменилась по сравнению с существующей конструкцией пушки.

Введение центрального пучка позволяет, таким образом, при тех же напряжениях на электродах получить больший ток пучка и, соответственно, увеличить его первеанс. Или при использовании тока пучка, что и в существующей конструкции, уменьшить плотность тока эмиссии катода и увеличить его долговечность, а также уменьшить рабочее напряжение на управляющей сетке при сохранении неизменным запирающего напряжения.

Введение центрального пучка создает для основного полого пучка радиальную расфокусирующую силу, действующую и в области между управляющей и анодной сетками, и за анодной сеткой. Положение кроссовера пучков с увеличенным током практически не изменяется, а радиусы пучков увеличиваются до 8,84 и 8,7 мм. Распределения тока по азимутальным углам наклона в кроссовере пучка изменяются незначительно, радиальные скорости электронов внутренней границы полого пучка под действием радиальной силы уменьшаются. При этом по величине интервал изменения радиальных углов наклона почти не изменяется, а уменьшаются именно максимальные

отрицательные углы наклона (см. рис. 4). Кроме того, при введении центрального пучка происходит уменьшение по абсолютной величине радиальных углов наклона траекторий основной части пучка. Если в существующей конструкции пушки траектории электронов, составляющих примерно 75 % тока пучка, имели углы наклона траекторий в интервале  $-10,22 \div -6,18^\circ$ , то для конструкций пушки с дополнительной плоской эмитирующей поверхностью интервал углов наклона траекторий электронов, составляющих те же 75 % тока пучка, равен  $-7,76 \div -3,62^\circ$ .

Таким образом, уменьшение максимальных углов наклона траекторий электронов позволило улучшить ламинарность пучка и его фокусировку в пролетном канале и, тем самым, уменьшить токооседание.

### Заключение

Исследованы особенности формирования электронных пучков в высокоперевансных электронных пушках с тремя сетками: теневой, управляющей и анодной. Показано, что такие пушки с катодом тороидальной формы формируют существенно неламинарный пучок. Область рабочих

значений потенциала управляющей сетки расположена ниже естественного потенциала. Следствием такого режима управляющей сетки является значительный (примерно, 25—36°) интервал изменения радиальных и азимутальных углов наклона траекторий частиц в области кроссовера пучка, причем интервал изменения азимутальных углов наклона превышает интервал изменения радиальных углов. Малые изменения величины коэффициента токопрохождения пучка через пролетный канал в рассмотренных ЭОС обусловлены сильной радиальной зависимостью фокусирующего магнитного поля из-за малой величины отношения периода МПФС к диаметру пролетного канала.

Предложено и исследовано техническое решение по улучшению характеристик электронной пушки с тремя сетками. Введение центрального пучка позволило увеличить на 13—15 % общий ток пучка, а за счет уменьшения отрицательных радиальных углов наклона траекторий частиц

улучшить фокусировку пучка в области пролетного канала. Все это дало возможность при использовании МПФС существующей конструкции в 3—4,3 раза уменьшить токооседание на стенки пролетного канала и увеличить коэффициент токопрохождения с 92,7 до 97,6—98,8 %.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ессин А. Д., Курицын В. М., Шаталин И. А и др. // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. — М.: ЦНИИ "Электроника". 1976. Вып. 6 (375). С. 66.
2. Усов В. Н // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1968. Вып. 6. С. 69.
3. Григорьев Ю. А., Олейников В. И., Правдин Б. С. и др. // Там же. 1988. Вып. 7. С. 34.
4. Архипов Д. А., Ильина Е. М., Кудряшов В. П. и др. // Прикладная физика. 2006. № 3. С. 109.
5. Журавлева В. Д., Семенов С. О. // Там же. С. 97.
6. Семенов С. О. // Там же. № 5. С. 58.
7. Петросян А. И., Роговин В. И., Семенов С. О. Пат. 2367052 РФ, МКИ Н 01 J 23/06. Электронная пушка СВЧ-прибора/ Заявлено 20.12.2007. Оpubл. 10.09.2009. БИ 25.

## Investigation of the high perveance electron-optic system

*A. I. Petrosyan, V. I. Rogovin, S. O. Semenov*  
The Federal State Unitary Enterprise «NPP "ALMAZ"»,  
1 Panfilova str. 1, Saratov, 410033, Russia  
E-mail: Almaz@overta.ru

*The results of 3D modeling the electron-optic system forming one cylindrical beam with microp-  
ervecance 3—8 mkA/V<sup>3/2</sup> for the powerful pulse TWT are presented. Considered are the possibilities  
of improving the electron guns with three grids and the EOS in whole. The total beam current in-  
creases on 8—15 %, beam focusing improves and beam landing value decreases in 3—4 times.*

PACS: 41.75.-i

*Keywords:* electron-optic system, high perveance electron beam, low voltage grid modulation.

Bibliography — 7 references.

*Received September 22, 2011*