

The results of modeling of the electro-optical system proposed and designed for the powerful multiple beam klystron Toshiba E3736 have been represented. Toshiba E3736 is the 10 MW L-band six-beam klystron being developed for the superconductive accelerator projects TESLA (XFEL), ILC. The key features of device are the new compact scheme of the confined flow multiple beam shaping, the most low cathode loading ($<2.1 \text{ A/cm}^2$) in comparison with analogues, a controlled beamlet size (diameter) in the drift tubes of klystron.

УДК 621.385.632

Высокоперевансные электронные пушки для мощных широкополосных низковольтных ЛБВ с сеточным управлением

Д. А. Архипов, Е. М. Ильина, В. П. Кудряшов, В. И. Роговин, В. Н. Усов
Федеральное государственное унитарное предприятие НПП "Алмаз", Саратов, Россия

Рассмотрены вопросы уменьшения анодного напряжения, массы и габаритов мощных импульсных ламп бегущей волны (ЛБВ) с сеточной модуляцией, а также расширения рабочей полосы частот усиливаемых сигналов. Показано, что это достигается увеличением переванса электронного потока, формируемого оригинальной трехсеточной электронной пушкой. Представлены особенности фокусировки высокоперевансного электронного потока магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС). Приведены основные параметры таких ЛБВ.

Многочисленные исследования, направленные на оптимизацию выходных параметров и миниатюризацию СВЧ-изделий с протяженным электронным пучком и радиоаппаратуры с их использованием, показывают, что существенные успехи в этом направлении возможны при увеличении переванса электронно-оптической системы (ЭОС).

В ЛБВ О-типа обычно используются хорошо зарекомендовавшие себя ЭОС с так называемой электронной пушкой Пирса. Однако у ЭОС с пушкой Пирса имеется существенный недостаток: при увеличении переванса до значений более $2 \text{ мкА/В}^{3/2}$ провисание потенциала в отверстии анода препятствует хорошему согласованию электронного пучка с магнитным полем фокусирующей системы и достижению высокого значения токопрохождения через пролетный канал ЛБВ.

Высокоперевансные ЭОС

Возможность миниатюризации спиральных ЛБВ появилась после создания трехсеточной конструкции электронной пушки, свободной от указанного недостатка, присущего пушке Пирса, и поэтому способной формировать электронный пучок с перевансом до $8 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Конструкция этой электронной пушки защищена авторским свидетельством [1], патентом [2] и удостоена золотой медали на выставке "Эврика-95" в Брюсселе [3].

Принцип действия этой пушки заключается в следующем [4]: первой, теневой, сеткой электронный пучок, вышедший с катода, разбивается на ряд секторов, между которыми имеется "электронная тень". В этой "тени" расположены элементы второй, управляющей,

сетки и третьей дополнительной анодной сетки, которая закрывает анодное отверстие и препятствует провисанию эквипотенциальных поверхностей.

Для улучшения условий согласования электронного пучка с магнитным полем была выбрана конфигурация катода, теневой и управляющей сеток в форме части тороидальной поверхности [2], сопряженной с плоскостью (рис. 1). Таким образом, в зоне ускорения формируется квазипольный сходящийся пучок, который за анодом становится сплошным цилиндрическим ламинарным потоком. Это было подтверждено как теоретическими расчетами, так и экспериментальными измерениями с помощью подвижного зонда.

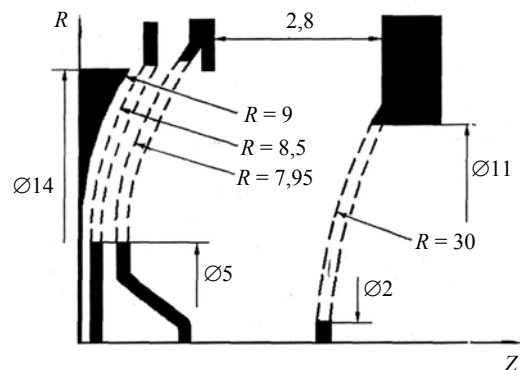


Рис. 1. Высокоперевансная электронная пушка

Испытания показали, что непосредственно за анодом электронный пучок имеет ярко выраженную секторную структуру. По мере удаления от анода сектора

"расплываются", и уже на расстоянии, составляющем 1,5—2,0 диаметра пучка, структура пучка становится практически однородной в азимутальном направлении (рис. 2) [5].

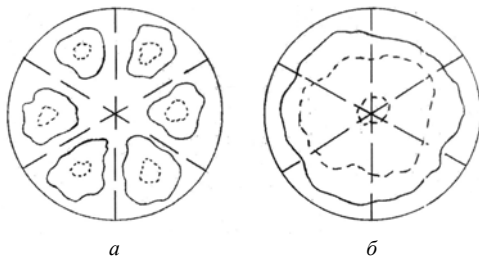


Рис. 2. Контуры поперечного сечения потока за анодом секторной пушки на расстоянии 0,1 (а) и 0,75 (б) диаметра пролетного канала от катодной сетки:
—, - - - - - линии равной плотности тока на уровне 10 и 80 % от максимальной, соответственно

Сформированный секторной пушкой электронный пучок с первеансом $8 \text{ мкА/В}^{3/2}$ фокусируется в магнитном поле соленоида с токопрохождением до 98 %. При фокусировке МПФС с первеансом пучка 4,5—5 $\text{мкА/В}^{3/2}$ получено токопрохождение 97 %.

Фокусировка высокопервеансного электронного пучка в пролетном канале ЛБВ имеет свои особенности, заключающиеся в существенном поперечном провисании потенциала из-за увеличенного пространственного заряда [6]. Это провисание необходимо учитывать при расчете ЛБВ.

Однако при увеличении первеанса до значений более $10 \text{ мкА/В}^{3/2}$ скорость продольного движения пучка становится намного меньше, чем величина скорости, определяемая напряжением замедляющей системы (ЗС). Расчеты показывают, что оптимальное значение первеанса, позволяющее увеличить КПД и существенно снизить рабочее напряжение, находится в пределах 4—6 $\text{мкА/В}^{3/2}$.

Увеличение первеанса ЭОС ЛБВ приводит к росту параметра усиления Пирса "С". Если в ЛБВ с пушкой Пирса значение параметра "С" составляет 0,05, то в высокопервеансной ЛБВ оно равно 0,15—0,2. Это вызывает увеличение усиления на единицу длины пространства взаимодействия, рост КПД и расширение полосы частот усиливаемых сигналов.

Увеличение параметра усиления Пирса приводит к тому, что в пучке появляется большая группа замедленных электронов. Происходит так называемая "высокочастотная (ВЧ) расфокусировка" потока. Токопрохождение в режиме усиления падает до 75—80 %. Однако

перегрева ЗС при этом не происходит, так как энергия осевших электронов мала.

Низковольтные мощные импульсные ЛБВ

ЭОС с секторной пушкой и фокусировкой МПФС была применена при создании ряда мощных импульсных ЛБВ с низковольтной сеточной модуляцией в дециметровом диапазоне длин волн. Для этого была разработана базовая конструкция, которая при массовом производстве показала высокую надежность, большой процент выхода годных изделий, широкую возможность замены отдельных узлов. Базовая конструкция состоит из двух секций: входной и выходной. Для обеспечения стабильного теплоотвода от ЗС применен метод термообжатия ВЧ-узла. Для предотвращения неоднородностей в поле МПФС ввод энергии выполнен в аноде. Для обеспечения теплоотвода от управляющей сетки высоковольтные изоляторы катодно-сеточного узла закреплены на охлаждаемом аноде. МПФС снабжена элементами для отвода тепла от колбы ВЧ-узла. Созданы два варианта базовой конструкции изделий: со спиральной ЗС и с ЗС типа "кольцо—стержень". В выходной секции спиральных высокопервеансных ЛБВ для обеспечения надежной работы и снижения уровня второй гармоники применяется защищенный авторским свидетельством [7] специальный оптимизатор. Для снижения уровня второй гармоники в ЛБВ с ЗС "кольцо—стержень" применяется одновременное изменение шага ЗС и ширины перемычки на выходном участке ЗС ЛБВ. Конструкция обеспечивает надежную эксплуатацию ЛБВ в мобильной аппаратуре.

К настоящему времени разработаны и производятся серийно или малыми партиями ЛБВ с разными уровнями импульсной и средней мощности в разных областях дециметрового диапазона длин волн. Основные выходные параметры, режимы питания и массогабаритные характеристики для шести ЛБВ приведены в табл. 1. Для сравнения в табл. 2 приведены характеристики аналогичных ЛБВ зарубежного производства, в которых использованы обычные пушки Пирса.

Заключение

Из сравнения приведенных табличных данных следует, что применение ЭОС с секторной пушкой с первеансом 3,5—5 $\text{мкА/В}^{3/2}$ приводит к снижению напряжения анода на 30—40 %, значительному расширению полосы частот усиливаемых сигналов, увеличению электронного КПД на 5—8 %, сокращению длины и массы ЛБВ на 25—30 %.

Таблица 1

Наименование	Рабочий диапазон, ГГц	$P_{\text{мин}}$, кВт	Q	$U_{\text{а макс}}$, кВ	$I_{\text{к макс}}$, А	$K_{\text{у}}$, дБ	$P_{\text{ц}}$, мкА/В ^{3/2}	Тип охлаждения	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
УВИ-А3022	1,20—1,35	30	50	18	10	36	4,14	В	30	105×114×885
Л-3	1,24—1,44	30	27	20	10	35	3,53	Ж	25	∅135×960
УВИ-А3019	1,35—1,60	5	25	9	4	35	4,7	В	9,5	730×125×115
УВИ-А3018	1,9—2,1	3,5	25	9	5	35	5,86	В	9,5	730×125×115
УВИ-А3005	1,2—1,7	30	25	18	8	35	3,31	Ж	25	960×135×150

УВИ-А3017	0,75—2,00	4,5	50	9	4,3	34	5	В	9,5	∅75×730
-----------	-----------	-----	----	---	-----	----	---	---	-----	---------

Таблица 2

Наименование	Рабочий диапазон, ГГц	P , кВт	Q	U_a , кВ	I_k , А	K_y , дБ	P_{μ} , мкА/В ^{3/2}	Масса, кг
VTL5741A1	1,2—1,6	30	200	25	8	37	2,03	40,8
VTL5740A1	0,95—1,20	25	100	22,5	7	37	2,07	40,7

Л и т е р а т у р а

1. Усов В. Н. Электронная пушка: А.с. 266075 СССР с приоритетом от 26.02.68; БИ. 1970. № 11. С. 69.
2. Правдин В. С., Олейников В. И., Усов В. Н., Шестеркин В. И. Электронная пушка: Пат. 1466579 РФ с приоритетом от 16.06.86; БИ. 1995. № 10. С. 256.
3. DIPLOMA. BRUSSELS EUREKA'95. 13.11.95.
4. Усов В. Н. Секторная электронная пушка, формирующая сплошной высокоперевансный электронный поток// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1968. № 6. С. 69—74.

5. Григорьев Ю. А., Олейников В. И., Правдин В. С., Усов В. Н., Шестеркин В. И. Секторная пушка с сетками для формирования высокоперевансного электронного потока// Там же. 1988. № 7. С. 34—37.

6. Григорьев Ю. А., Ильина Е. М., Роговин В. И., Усов В. Н. Учет провисания потенциала, вращательной энергии электронов и релятивистских эффектов в высокоперевансных пучках// Там же. 1994. № 3. С. 52—55.

7. Кудряшов В. П., Миркин В. И., Песин Б. В. СВЧ-усилитель с длительным взаимодействием: А.с. 1128304 СССР с приоритетом от 11.06.82; БИ. 1984. № 45. С. 170.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

High-perveance electron guns for powerful broadband low-voltage grid-controlled TWT

D. A. Arhipov, E. M. Ilyina, V. P. Kudryashov, V. I. Rogovin, V. N. Usov
The Federal State Unitary Enterprise NPP "Almaz", Saratov, Russia

Problems of decrease of anode voltage, mass, and dimensions of powerful pulse traveling-wave tube (TWT) with grid modulation, as well as broadening the operating frequency range of signals to be amplified are considered. It is shown, this is achieved by the increase of a perveance of an electron formed by the original three-grid electron gun. The features of focusing the high-perveance electron beam by PPM system are shown. Main parameters of such TWTs are presented.