

Электронные и ионные пучки

УДК 621.3.032, 621.325.624

Моделирование электронно-оптической системы клистрона с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона

А. И. Тореев, Ю. Г. Гамаюнов, Е. В. Патрушева

Выполнено моделирование электронно-оптической системы мощного клистрона с распределенным взаимодействием коротковолновой части миллиметрового диапазона, обеспечивающей формирование электронного пучка с компрессией ~ 200 и его транспортировку в пролетном канале резонаторной системы диаметром 0,38 мм при анодном напряжении 17,5 кВ и токе пучка 0,7 А.

PACS: 41.75.-i

Ключевые слова: клистрон, моделирование, электронный пучок, транспортировка.

Введение

В клистронах с распределенным взаимодействием (КРВ), так же как и в любых мощных приборах 0-типа миллиметрового диапазона, работающих при относительно невысоких ускоряющих напряжениях (менее 20 кВ), переход в более коротковолновый участок неизбежно сопровождается уменьшением всех геометрических размеров резонаторной системы и в том числе диаметра пролетного канала, что осложняет формирование и транспортировку электронных пучков. Следствием уменьшения диаметра пролетного канала (до десятых долей миллиметров) является повышение требований к уровню токопрохождения пучка с высокой плотностью мощности (десятки МВт/см²), так как попадание даже небольшой доли электронного пучка на миниатюрные элементы резонаторов может привести к их разрушению. При этом помимо ужесточения требований к соотношению пучка и пролетного канала, минимизации влияния неоднородностей электрических и магнитных полей приходится учитывать возмущающее влияние на пучок поперечных тепловых скоростей электронов.

Для нейтрализации влияния тепловых скоростей электронов в работе [1] был реализован подход к проектированию электронно-оптических

систем (ЭОС), в рамках которого осуществлялась минимизация расплывания теплового электронного пучка в пролетном канале путем введения оптимального магнитного потока на катоде в пушке с частичной магнитной экранировкой. Расчет электронной пушки проводился методом синтеза на такой радиус ламинарного пучка в кроссовере и, следовательно, "холодную" компрессию, при которых реальный тепловой электронный пучок, формируемый этой же пушкой, имеет минимальный радиус условной границы с заданным токодержанием в пучностях. Разработанная на основе такого подхода электронная пушка обеспечивала при ускоряющем напряжении 18—19 кВ ток пучка 0,5—0,6 А (микротоке пучка $P_{\mu} \sim 0,2$) и была успешно применена в мощном КРВ для средней части миллиметрового диапазона [2]. Пучок транспортировался в пролетном канале диаметром 0,5 мм. Фокусирующее магнитное поле было $\sim 0,65$ — $0,67$ Тл (превышение рабочего магнитного поля над бриллиантовским $\sim 1,7$). Расчетный радиус ламинарного пучка составлял 0,133 мм, а в пучностях теплового пучка (по уровню 99 % токодержания) — 0,19 мм. Магнитное поле на катоде было $B_k = 0,0047$ Тл. Расчетная "холодная" компрессия пучка, определяемая как отношение площади сферического катода к площади поперечного сечения пучка в кроссовере, была $S_0 \sim 115$ (диаметр катода 2,8 мм, радиус кривизны $R_{кр} = 3,92$ мм). Известно, что в электронных пушках мощных приборов коротковолновой части миллиметрового диапазона требуемая величина компрессии может достигать нескольких сотен [3, 4]. Если ориентироваться на получение в диапазоне ~ 90 Гц уровней мощности ~ 2 кВт, как и в КРВ [2], то оценки показали, что диаметр пролетного канала должен быть уменьшен до 0,3—0,4 мм, а величина тока

Тореев Александр Иванович, старший научный сотрудник.

Гамаюнов Юрий Григорьевич, профессор.

Патрушева Елена Владимировна, научный сотрудник.

Саратовский государственный университет

им. Н. Г. Чернышевского.

Россия, 420012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

E-mail: PatrushevaEV@info.sgu.ru

Статья поступила в редакцию 22 января 2010 г.

© Тореев А. И., Гамаюнов Ю. Г., Патрушева Е. В., 2011

должна возрасти (из-за уменьшения эффективности взаимодействия пучка с ВЧ-полем распределенных резонаторов) до 0,7 А. При заполнении пучком пролетного канала, равном 0,6, радиус пучка должен составлять 0,09—0,12 мм, а плотность тока в пучке 2750—1540 А/см². При эмиссионной способности термокатода ~10 А/см² минимальная компрессия пучка по площади должна быть не менее 150, т. е. достаточно высокой. В работе [5] показана возможность моделирования систем формирования с высокой компрессией электронного пучка (~500 при микропервеансе $P_\mu < 0,5$) на основе метода синтеза. Высокая компрессия достигается за счет введения с некоторой плоскости между катодом и анодом дополнительного (к магнитному полю сопровождения) магнитного потока, а также выбора протяженности области нарастания потенциала в пучке.

Предложенный в работе [5] метод расчета представляется перспективным при проектировании ЭОС приборов 0-типа, в которых требуется обеспечивать высокую степень сжатия электронного пучка, и поэтому в настоящей работе он был использован при расчете ЭОС формирования для КРВ коротковолновой части миллиметрового диапазона с параметрами, близкими из работы [2].

Выбор исходных данных и результаты расчета

В качестве исходных данных для расчета электронной пушки было выбрано ускоряющее напряжение электронного пучка 17,5 кВ, ток пучка 0,7 А (микропервеанс $P_\mu = 0,302$). Выбор размера термокатода был обусловлен ограниченностью эмиссионной способности, а уровня магнитного поля — возможностью его обеспечения в пакетированных КРВ. Если ориентироваться на получение плотности токоотбора с катода не более 10 А/см², то диаметр катода может быть ~ 3,2 мм. Непосредственное моделирование диаметра пролетного канала при переходе из средневолновой в коротковолновую часть миллиметрового диапазона показывает, что он должен быть уменьшен с 0,5 [2] до 0,308 мм. При коэффициенте заполнения пролетного канала пучком, равном 0,6, радиус ламинарного пучка составит ~0,092 мм, и для его транспортировки потребуется магнитное фокусирующее поле величиной ~1,05 Тл (превышение рабочего магнитного поля над бриллюэновским $n_0 \sim 1,6$, примерно как и в [2]). Практическая реализация таких больших уровней полей потребует применять слишком тяжелые пакетированные магниты и создаст проблемы, связанные с насыщением материала полюсных наконечников [4].

Для уменьшения требуемого уровня магнитного поля диаметр пролетного канала был увеличен до 0,38 мм и, соответственно, новый радиус ламинарного пучка составил $r_0 \sim 0,114$ мм, а величина магнитного фокусирующего поля 0,85 Тл при том же его превышении над бриллюэновским полем. Такой уровень магнитного поля может быть обеспечен в зазоре магнитов, используемых в КРВ миллиметрового диапазона [2].

Для расчета пушки, формирующей электронный пучок с указанными параметрами, был использован метод синтеза систем формирования с высокой компрессией пучка [5]. При этом, так как в работе [5] методика расчета предусматривала определение диаметра катода, а в рассматриваемом случае он был выбран, то вначале в рамках решения внутренней задачи синтеза была выполнена серия расчетов, чтобы получаемый при расчетах диаметр катода сравнился бы с выбранным. Это достигалось путем изменения при расчетах угла наклона граничной траектории пучка у катода (определяющего кривизну катода), протяженности области нарастания потенциала и области, где магнитное поле сопровождает пучок. В сумме это позволило изменять компрессию пучка до тех пор, пока она не стала соответствовать заданным размерам катода и пучка. Были получены следующие результаты: протяженность области нарастания потенциала и области сопровождения пучка составила $\sim 0,75 l_0$ ($l_0 = 10,3$ мм — расстояние от катода до кроссовера), радиус кривизны катода $R_{кр} = 3,68$ мм, магнитное поле на катоде $B_k = 0,0027$ Тл. В сравнении с электронной пушкой [1] уменьшение радиуса кривизны катода и магнитного поля на катоде рассчитанной пушки связано как с различием их микропервеансов, так и компрессий. Расчетная компрессия данной пушки составляет ~207. Расчет геометрии электродов пушки был проведен в рамках решения внешней задачи синтеза [5]. На рис. 1 представлены: конфигурация и расположение электродов пушки, траектория граничного электрона и распределение магнитного поля. На рис. 2 показана геометрия пушки, полученная с учетом конструктивно-технологических требований. Анод и фокусирующий электрод видоизменены по отношению к расчетным с учетом обеспечения пробойного расстояния между анодом и фокусирующим электродом и теплового зазора фокусирующий электрод—катод. На рис. 2 отображен контур пучка, рассчитанный по программе анализа. Средний радиус пучка, рассчитанный по программе анализа, а также расстояние от катода до кроссовера пушки и радиус пучка в кроссовере в основном совпадают с их значениями, полученными в рамках синтеза.

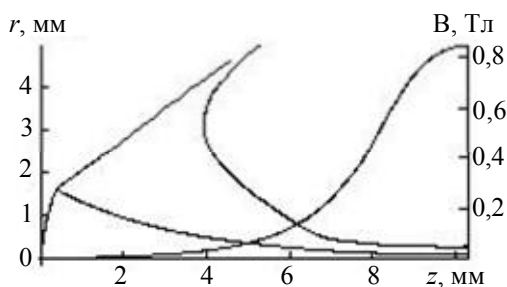


Рис. 1. Геометрия электродов пушки, распределение магнитного поля и граничная траектория электронного пучка

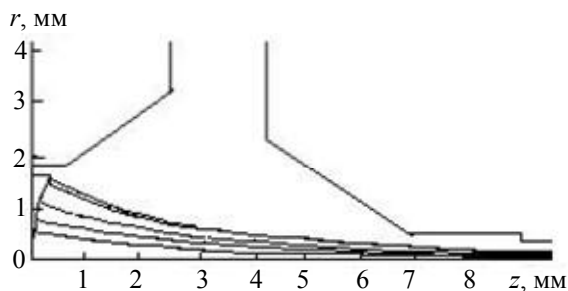


Рис. 2. Конфигурация электродов пушки в соответствии с конструктивно-технологической доработкой и контур электронного пучка

Учет влияния тепловых скоростей электронов на конфигурацию пучка

Известно [3], что в коротковолновой части миллиметрового диапазона поперечные тепловые скорости электронов оказывают значительное влияние на возмущение пучка, приводящее к расширению пучка, образованию "теплого" ореола и неравномерному распределению плотности тока по сечению. Условная граница теплового пучка с заданным токосодержанием J пульсирует вдоль продольной координаты. При оценке влияния тепловых скоростей электронов на конфигурацию электронного пучка был использован метод, предложенный в [6] и затем развитый в [7]. Расчеты конфигурации теплового пучка проводились по программе, в которой был реализован алгоритм, основанный на нахождении в ЭОС траекторий двух характерных электронов в пучке, один из которых покидает кромку катода с нулевой начальной скоростью (нетепловой электрон), а второй стартует из центра катода с отличной от нуля поперечной скоростью (тепловой электрон). Через эти траектории, как показано в [6, 7], можно найти все основные характеристики теплового пучка (распределение плотности тока по сечению, долю тока, содержащуюся в пределах определенного радиуса, радиус условной границы теплового пучка). При проведении расчетов траекторий нетеплового и теплового электронов в области пушки и пролетного канала, а по ним и условной границы с

уровнем токосодержания $J \sim 99\%$ в ее пределах (оггибающей теплового пучка) использовались распределения потенциала и магнитного поля в пушке, найденные синтезом. Температура катода была принята $T = 1500\text{ К}$, что соответствовало [7] параметру тепловых скоростей $\lambda = P_{\mu}U_0/T = 3,52$. Из расчетов следовала возможность оценки, в какой мере конфигурация теплового пучка отличается от ламинарного пучка, т. е. если не учитывать тепловые скорости электронов. Результаты траекторного анализа представлены на рис. 3, в котором нормировка поперечных размеров проведена к радиусу ламинарного пучка r_0 , а продольных размеров — к нормировочной величине [5]

$$l = r_0 \sqrt{\frac{iS_0}{0,0605P_{\mu}}} \sim 8,1\text{ мм.}$$

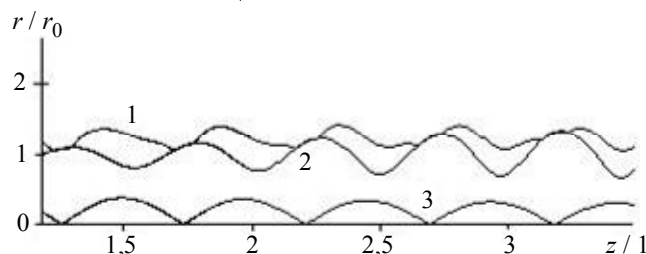


Рис. 3. Конфигурация "теплового" электронного пучка в пролетном канале:

1 — условная граница теплового пучка по уровню токосодержания $J = 0,99$; 2 и 3 — траектории нетеплового и теплового электронов, соответственно. Начало координат продольной оси совмещено с кроссовером холодного пучка, а траектория теплового электрона под ось ЭОС отражена симметрично на верхнюю полуплоскость

Из рис. 3 видно, что радиус оггибающей теплового пучка увеличился в 1,4 раза по сравнению с радиусом ламинарного пучка и равен в пучностях $r = 0,16\text{ мм}$. Учитывая то, что радиус пролетного канала равен $r_a = 0,19\text{ мм}$, получаем величину зазора между тепловым пучком и пролетным каналом 0,03 мм. Последнее позволяет обеспечить достаточно высокий уровень токопрохождения электронного пучка в пролетном канале диаметром 0,38 мм при условии соблюдения очень жестких требований к соосности пучка с пролетным каналом, а также достижения минимального влияния неоднородностей магнитного поля на формирование и транспортировку пучка.

Заключение

Представлены результаты моделирования электронно-оптической системы мощного, с уровнем выходной мощности ~ 2 -х киловатт, клистрона с распределенным взаимодействием коротковолновой части миллиметрового диапазона, обеспечи-

вающей формирование и транспортировку аксиально-симметричного высококомпрессионного (с компрессией ~ 200) электронного пучка при ускоряющем напряжении 17,5 кВ, токе пучка 0,7 А и магнитном фокусирующем поле 0,85 Тл. Проведены расчеты конфигурации пучка с учетом влияния начальных скоростей электронов и показана возможность обеспечения достаточно высокого токопрохождения теплового пучка в пролетном канале диаметром 0,38 мм. Результаты моделирования могут быть полезны при разработке мощных КРВ, а также других приборов 0-типа коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Л и т е р а т у р а

1. Гамаюнов Ю. Г., Тореев А. И., Патрушева Е. В. Расчет и экспериментальное исследование компрессионной электронной пушки для ЭВП 0-типа коротковолнового диапазона

длин волн//Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. 1998. Вып. 2 (472). С. 29.

2. Тореев А. И., Федоров В. К., Патрушева Е. В. Клистрон с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона //Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 1001.

3. *Gamayunov Y. G., Toreev A. I., Patrusheva E. V.* // Proc. Conf. IVEC/IVESC, April. 25—27, 2006, Monterey, California, USA. 2006. P. 167.

4. *Grant T. J., Garcia R., Miram G. V., Smith B.* Bonded grid electron gun for 95 GHz. extended interaction amplifier(ETA)//Int. Electron Devices Meet., Washington. D. C., 1983. Technical Digest New York. N. Y., 1983. P. 141.

5. Гамаюнов Ю. Г., Патрушева Е. В., Тореев А. И., Шаталина С. А. Моделирование электронно-оптических систем формирования с высокой компрессией электронного пучка//Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 3. С. 344.

6. *Кайно П., Уотерс У., Курштейн У.* Формирование электронных пучков. — М., 1970.

7. Гамаюнов Ю. Г., Тореев А. И., Патрушева Е. В. Возмущение электронного пучка начальными тепловыми скоростями электронов при наличии магнитного поля в области формирования//Вопросы прикладной физики. 2003. Вып. 9. С. 15—19.

Numerical simulation of the electron-optical system for millimeter-wave extended interaction klystron

A. I. Toreev, Yu. G. Gamayunov, E. V. Patrusheva
Saratov State University, Saratov, 420012, Russia

Numerical simulation of the electron-optical system for a millimeter wave power extended interaction klystron have been executed. This system provides forming an electron beam with compression ~ 200 and transportation it through the transmission channel with the diameter of 0.38 mm at the anode voltage of 17.5 kV and the beam current of 0.7 A.

PACS: 41.75.-i

Keywords: klystron, modeling, electron beam, beam transport.

Bibliography — 7 references.

Received January 22, 2010