

УДК 681.7

К использованию магнетронно-инжекторных пушек в пучково-плазменных приборах СВЧ

М. А. Завьялов, В. А. Сыровой

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

В. Н. Мануилов

Нижегородский госуниверситет, г. Н. Новгород, Россия

Е. А. Солуянова

Нижегородский филиал "Гиком-НН" ЗАО «НПП "Гиком"», г. Н. Новгород, Россия

Обсуждены вопросы применения магнетронно-инжекторных пушек (МИП) в пучково-плазменных приборах СВЧ. Приведены данные математического моделирования электронно-оптических систем (ЭОС) и предложения по разработке оптики по схеме "синтез — технологические электроды — анализ" с применением геометризованной теории плотных электронных пучков.

В последнее время наблюдается прогресс в нерелятивистской плазменной электронике СВЧ. В ВЭИ создан черенковский пучково-плазменный усилитель с нерелятивистским электронным пучком на основе гибридной замедляющей структуры в виде цепочки связанных резонаторов (ЦСР) с заполненным плазмой пролетным каналом [1—5]. Гибридные плазменно-резонаторные системы сочетают в себе высокую эффективность взаимодействия, характерную для плазменных волноводов, с возможностью практически полного излучения энергии возбуждаемых СВЧ-полей. Высокие параметры нерелятивистских черенковских пучково-плазменных усилителей и генераторов СВЧ ("плазменные" ЛБВ) определяются эффективностью взаимодействия пучок—плазма, имеющего объемный характер, компенсацией пространственного заряда электронного пучка, а также длительным синхронизмом пучка с волнами гибридных замедляющих структур.

Создание мощного широкополосного СВЧ-усилителя (выходная мощность 20 кВт, ширина полосы 30 %, КПД 30 %) потребовало решения целого ряда физико-технических задач: разработки систем формирования и транспортировки электронного пучка (20 кэВ, ~3 А) в узком протяженном канале замедляющей структуры (диаметр 1,2 см, длина ~40 см), заполненном плазмой; системы газодинамики отпаянного прибора, обеспечивающей регулировку давления рабочего газа в требуемых пределах (10^{-6} — 10^{-3} мм рт. ст.) с помощью водородных генераторов, а также вакуумный перепад между плазменной электродинамической системой и ЭОС пушки; систем вывода СВЧ-мощности. Особенности и характеристики данных приборов описаны в работах [1—7].

В данном приборе электронный пучок транспортируется в пролетном канале, помещенном в продольное магнитное поле $B_{zm} = 0,25$ Т. При давлении газа $7 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. в результате ионизации газа электронным пучком и пучково-плазменного взаимодействия в канале ЦСР генерируется плазма с концентрацией до 10^{12} см $^{-3}$ и электронной температурой ~15—20 эВ. Для плазменного режима работы прибора необходимо выполнение соотношений

$$\omega_b^2 \ll \omega^2 < \omega_e^2 < \omega_{eh}^2,$$

где ω_e — электронная частота пучка;
 ω — рабочая частота;
 ω_e — электронная плазменная частота;
 ω_{eh} — электронная циклотронная частота.

В действующей модели пучково-плазменного прибора (ППП) СВЧ-электронный пучок эмитируется плоским термокатодом с диаметром 1 см. Параметры пучка согласовывались с расчетом электродинамической структуры. В плоскости катода магнитное поле составляет $0,3-0,5 B_{zm}$. Расчет ЭОС проводился с помощью пакетов ЭРА, ЭСТАМП, ЭРА-РИНОТС [1-3, 7].

В рабочем режиме в системе реализуется состояние "плазменный пучок", при котором электронный поток с концентрацией электронов $n_b = 3 \cdot 40^9 \text{ см}^{-3}$ транспортируется в плотной плазме $n_e \geq 10^2 n_b$, генерируемой электронным пучком при развитии пучково-плазменного разряда [1, 8, 9]. Для снижения влияния пучково-плазменных процессов в гибридной электродинамической структуре на работу ЭОС пушки данные системы, как отмечалось, разделены встроенной системой дифференциальной откачки. Она состоит из сорбционного насоса и работающего в поле соленоида магнито-разрядного насоса, электроды которого образуют ионную ловушку для защиты термоэмиссионного катода от ионной бомбардировки. Из-за сложных режимов работы ППП СВЧ в описываемой модели применялись высокотемпературные W-катоды (температура $\sim 2530 \text{ }^\circ\text{C}$, мощность системы нагрева 500 Вт, эффективность $\sim 6 \text{ mA/Вт}$) и LaB_6 -катоды ($1650 \text{ }^\circ\text{C}$, 120 Вт, $\sim 25 \text{ mA/Вт}$), последние из которых в настоящее время являются основными элементами электронных пушек. В традиционных вакуумных приборах СВЧ применяются низкотемпературные оксидные катоды ($900-1000 \text{ }^\circ\text{C}$), а также W-Ba-катоды ($\sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$); в то же время в мощных системах также используются LaB_6 -катоды.

Для пучково-плазменного усилителя с повышенной мощностью СВЧ-излучения разработана ЭОС с электронным пучком мощностью 300 кВт (30 кВ, 10 А). Увеличение тока пучка до 10 А вызвало необходимость выбора LaB_6 -катода диаметром 1,5 см, при этом оставались жесткие ограничения по геометрии транспортируемого на длину ~ 50 см электронного пучка диаметром $0,8-0,9$ см при минимальных пульсациях границы. Определение формы и расположения экрана относительно соленоида и катода электронной пушки проводилось по программе SPLAV, а влияние технологичной формы электродов на геометрию потока — по программе траекторного анализа ЭРА. Схема ЭОС пушки с указанием основных конструктивных размеров и взаимного расположения элементов ЭОС и магнитной системы приведены в [7].

Ряд вопросов построения ЭОС электронных пушек для перспективных пучково-плазменных приборов СВЧ обсуждается в [8].

Продвижение разработок ППП СВЧ в область еще больших мощностей требует создания пушек, формирующих нерелятивистские электронные потоки мощностью до 1 МВт в квазистационарном режиме (длительность импульса $\geq 1 \text{ мс}$). При этом основные условия транспортировки электронного пучка, определяемые параметрами гибридных электродинамических систем ППП СВЧ, должны соответствовать разработанным моделям плазменных ЛБВ.

В настоящей работе предлагается применение в ППП СВЧ электронной пушки магнетронно-инжекторного типа. Известны разработки высокоперевансных магнетронных пушек, формирующих трубчатые электронные пучки для вакуумных черенковских приборов СВЧ (клистроны, ЛБВ) [9].

Широко развито также направление по применению магнетронных инжекторов, формирующих кольцевые потоки электронов со спиральными тра-

екториями (винтовые электронные пучки) для мазеров на циклотронном резонансе (гиротроны) [10].

Возможность применения мощных высокопереванских магнетронных пушек для нерелятивистских пучково-плазменных приборов СВЧ черенковского типа (плазменных ЛБВ) выдвигает ряд специфических требований к их характеристикам. Объемные волны в гибридной плазменной структуре имеют максимальное значение продольной компоненты электрического поля на оси волновода в отличие от обычных вакуумных замедляющих структур, в которых эффективное взаимодействие электронного пучка с полем волны происходит лишь в непосредственной близости от структуры, что при значительной толщине пучка приводит к участию во взаимодействии только его поверхностной части. Поэтому магнетронная пушка должна формировать сплошной цилиндрический электронный пучок с достаточной равномерностью распределения плотности тока по его сечению. В отличие от обычных пушек магнетронного типа это, очевидно, требует не только значительного увеличения эмиссионной поверхности конусного катода, но и покрытия эмиттирующим материалом сферической части катода. Поскольку черенковский механизм излучения предполагает наличие у электрона в основном продольной компоненты скорости, МИП должна формировать пучок с малым уровнем пульсации (во всяком случае, величина амплитуды пульсации не должна превышать 10—15 % от максимального радиуса пучка в канале транспортировки). Для обеспечения большого срока службы катода плотность тока эмиссии не должна превышать 6 А/см², а распределение плотности тока вдоль образующей катода должно быть достаточно близко к равномерному. Наконец, следует обеспечить электропрочность пушки. Считается, что для этого “холодное” электрическое поле на катоде не должно превышать 6 кВ/мм. Отметим также, что МИП должна работать в режиме ограничения тока пространственным зарядом. Легко видеть, что указанные требования, в общем, противоречивы и значительно отличаются от принятых при разработке МИП для гироприборов. Это делает невозможным непосредственное применение для оценки параметров МИП хорошо развитой адиабатической теории МИП гиротронов [11] и приводит к необходимости разработки новых, адекватных поставленной задаче, подходов для проектирования МИП пучково-плазменных приборов.

Ниже представлены предварительные результаты теоретического расчета МИП для ППП со следующими параметрами:

ускоряющее напряжение — $U_0 = 30$ кВ;

ток пучка — $I \approx 20$ А;

радиус пучка в пространстве взаимодействия — $R_{\max} = 5$ мм;

амплитуда фокусирующего магнитного поля — $B_0 = 2,5$ кГс;

плотность тока катода — $j_k \leq 6$ А/см²;

холодное электрическое поле на катоде — $E_k < 6$ кВ/мм;

пульсации верхней границы потока, не более — $\Delta R_0/R_{\max} \approx 15$ %.

Расчет и оптимизация формы электродов и электрического режима пушки проводились на базе траекторного анализа по программе ЭПОС [12]. Рассматривался режим ограничения тока пространственным зарядом. Как показали расчеты, для обеспечения умеренного уровня пульсаций катод пушки необходимо располагать в достаточно сильном магнитном поле порядка $B_0/2$.

При этом радиус эмиттирующей части катода, как легко оценить из условия сохранения магнитного потока внутри магнитной силовой трубки, вдоль поверхности которой движутся периферийные электроны, должен быть около

7,5 мм. В этом случае в диодном варианте пушки, согласно расчетным данным, радиус анода многократно превышает радиус катода и холодное поле на катоде можно оценить по элементарной формуле $E_k = U_0/R_k$. Полагая средний радиус катода $R_k \approx 5$ мм, получаем $E_k \approx 6$ кВ/мм, что близко к предельно допустимой величине. Траекторный анализ показывает, что на сферической части катода электрическое поле достигает величины 5,5—6,5 кВ/мм. Большая величина поля приводит к чрезмерно высокой пиковой плотности тока в режиме ограничения тока пространственным зарядом — $j_k \approx 10$ —15 А/см², а перепад плотностей тока по эмиттеру может достигать трех раз. Велика и неоднородность распределения тока по сечению в канале транспортировки. Здесь перепад плотностей тока доходит до двух раз. Отметим, наконец, что величина пульсации траекторий составляет около 20 % от R_{\max} , что несколько превышает допуск.

Поэтому далее рассматривался триодный вариант пушки с анодным напряжением $U_a = 15$ кВ (рис. 1).

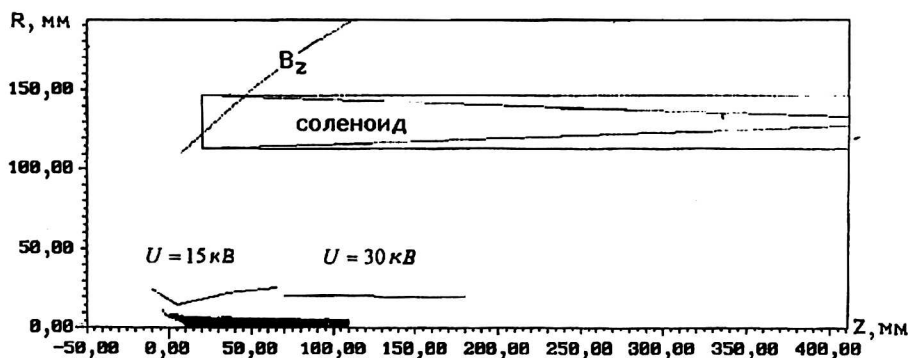


Рис. 1. Общий вид электронно-оптической системы:
 $B_0 = 2,5$ кГс; $B_k = 1,2$ кГс; $B_{110} = 2$ кГс

Оптимизация формы электродов пушки позволила в данном случае получить пучок с током 16,7 А, при уровне пульсации около 7 % и достаточно близком к равномерному распределению плотности тока катода (рис. 2). В данном случае $j_k \leq 6$ А/см². Перепад плотностей тока по сечению остается, однако, достаточно большим (рис. 3). Тем не менее, данная система уже позволяет формировать пучок с мощностью 500 кВт с приемлемыми параметрами. Электрическое поле на катоде не превышает 3,6 кВ/мм. Отметим, что согласно данным траекторного анализа, параметры пучка слабо меняются при увеличении напряжения на втором аноде до 40 кВ (мощность пучка 670 кВт). Таким образом, рассмотренный триодный вариант пушки позволяет увеличить мощность пучка примерно вдвое по сравнению с рассмотренной в [7] пирсовской оптикой.

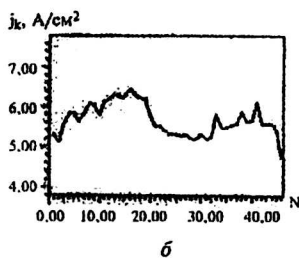
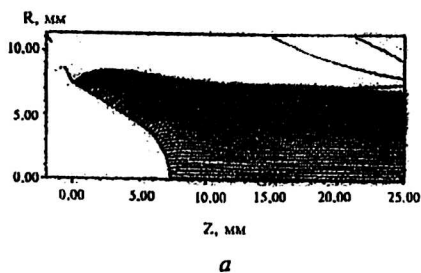


Рис. 2. Оптимизация формы электродов пушки:
 а — электронные траектории в области пушки:

- $E_{R_{\min}} = 0,304,$
- $E_{R_{\max}} = 0,595;$
- $E_{Z_{\min}} = -0,064,$
- $E_{Z_{\max}} = 0,042;$
- $R_{\text{вых}} = 15,000;$

б — плотность тока катода (N — номер трубки, нумерация слева направо)

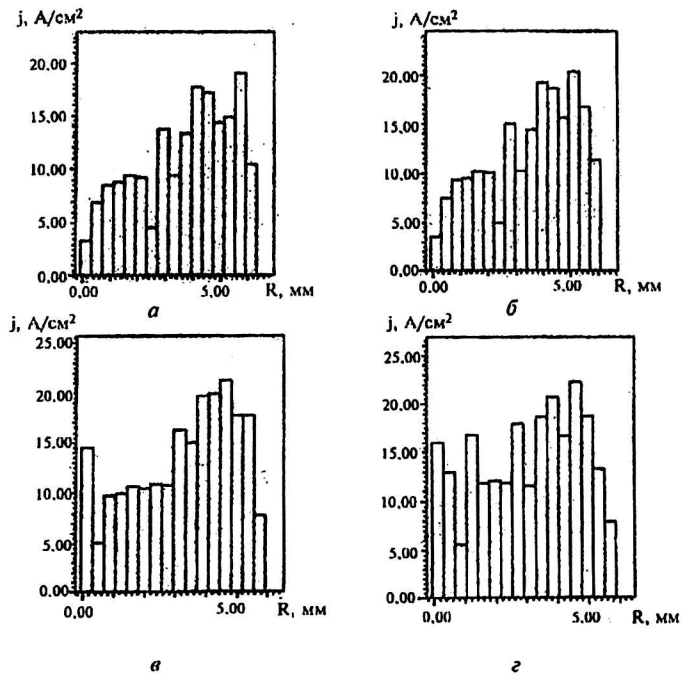


Рис. 3. Распределение плотности тока по сечениям, перпендикулярным оси:
 $a - z = 55,00$ мм; $б - z = 70,00$ мм; $в - z = 85,00$ мм; $г - z = 100,00$ мм

Приведенные выше результаты расчетов с использованием программы траекторного анализа, созданной для описания ЭОС гиротронов, оставляют мало надежд на реализацию диодного варианта магнетронно-инжекционной пушки ППП. Вместе с тем, следует заметить, что разработка оптики мощных гиротронов шла по классической схеме "синтез—технологичные электроды—анализ" [13], что позволило на два порядка поднять КПД прибора, составлявший вначале 0,4 %. Учитывая, что пушка для ППП по своим параметрам и геометрии существенно отличается от гиротронного аналога, представляется целесообразным провести ее расчет и оптимизацию по той же схеме.

Использованное в работе [13] точное решение с разделяющимися в сферических координатах переменными не подходит для этой цели. Не позволяет дать решение проблемы и традиционная параксиальная теория, которая не могла быть применена уже для тонких трубчатых пучков в [13] из-за ориентации магнитного поля на катоде: условия термоэмиссии в параксиальной теории могут быть выполнены только при касательном или нормальном к эмитирующей поверхности магнитном поле. Еще дальше эта модель от потребностей ЭОС ППП с непараксиальным кольцевым пучком, трансформирующимся вблизи от оси системы в сплошной.

Перечисленные ограничения традиционного подхода отсутствуют в моделях, основанных на геометризованной теории плотных электронных пучков [14]. Решение в высших приближениях представляется в виде фрагментов рядов Тейлора по поперечной координате, которые выгодно отличаются, как показывает тестирование, от асимптотических рядов по малому геометрическому параметру, где новый член часто не только не улучшает, но и портит результат.

В третьем приближении, учитывающем третью производную плотности тока эмиссии и вторую производную кривизны стартовой поверхности, за

счет выбора базовой трубки тока и распределения потенциала на ней при заданном магнитном поле появляется возможность управлять формой катода и токооборотом. В типичных для гиротронов по геометрии эмиттера и распределению плотности тока случаях, но при $d/r = 0,75$, d — ширина пояса, r — радиус его центра, ошибка описания геометрии катода и распределения плотности тока эмиссии находится на уровне 1–2 %.

Следует отметить, что геометризованная модель ЭОС для непараксиального трубчатого пучка, трансформирующегося в квазисплошной, могла бы облегчить проблемы создания системы подогрева, обеспечивающей эмиссию с закругленного носика сужающегося конического катода. Необходимо подчеркнуть и то обстоятельство, что программы траекторного анализа не предназначены для проведения оптимизационных расчетов принципиально новых ЭОС.

Литература

1. Пучково-плазменные процессы в электронно-лучевой аппаратуре промышленного применения // Сб. научных трудов ВЭИ / Под ред. В. И. Переводчиков. — М.: ВЭИ, 1994.
2. Бацких Г. И., Гуреев К. Г., Завьялов М. А. и др. // Радиотехника и электроника, 1993. Т. 38. № 9. С. 1681.
3. Perevodchikov V. I., Zavjalov M. A., Mitin L. A. et al. // 9 BEAMS. Washington, 1992, V. 2. P. 1318; 10 BEAMS. San Diego, 1994; 11 BEAMS. Prague, 1996. V. 1. P. 229, 430; 12 BEAMS. Haifa, 1998. P. 323.
4. Zavjalov M. A., Mitin L. A., Perevodchikov V. I. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science, 1994. V. 22. № 5. P. 600.
5. Митин Л. А., Переводчиков В. И., Завьялов М. А. и др. // Физика плазмы, 1994. Т. 20. № 7, 8. С. 733.
6. Nusinovich G., Carmel Y., Antonsen T. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science, 1998. V. 26. № 3. P. 628.
7. Завьялов М. А., Неганова Л. А., Сыровой В. А. // Прикладная физика, 1998. Вып. 3–4. С. 65–94.
8. Завьялов М. А., Переводчиков В. И., Сыровой В. А. // Там же, 2000. Вып. 2. С. 122–132.
9. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. — М.: Сов. радио, 1966.
10. Мануилов В. Н. Дис. д.-ра физ.-мат. наук. — Нижний Новгород, 2000.
11. Цимринг Ш. Е. Формирование винтовых электронных пучков: В кн. Лекции по электронике СВЧ. Кн. 4. — Саратов: СГУ, 1974. С. 3–94.
12. Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. Effective code for numerical simulation of the helical relativistic electron beam. Proceedings of the 11-th International Conference on High Power Particle Beams, Prague, Czech Republic, June 10–14, 1996. V. 1. P. 385–388.
13. Мануилов В. Н., Райский Б. В., Цимринг Ш. Е., Солуянова Е. А. // Прикладная физика, 1998. № 3–4. С. 95.
14. Сыровой В. А. // РЭ, 1999. Т. 44. № 6. С. 645.

To using of magnetron-injection guns for beam-plasma microwave tubes

M. A. Zavjalov, V. A. Syrovoy

The Lenin's All-Russian Electrical Engineering Institute, Moscow, Russia

V. N. Manuilov

Nizhny Novgorod State University, N. Novgorod, Russia

E. A. Solujanova

Nizhny Novgorod Division of "Gycom", N. Novgorod, Russia

Problems connected with using of magnetron-injection guns (MIG) for beam-plasma microwave tubes are discussed. Some data of computer modeling for such electron-optical systems (EOS) and proposals of design based on scheme "synthesis—technological electrodes—analysis" with dense beam geometrized theory application are given.