

УДК 621.385.69

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НИЗКОВОЛЬТНОГО ГИРОТРОНА С НЕАДИАБАТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКОЙ

М. Ю. Глявин¹, А. Л. Гольденберг¹, В. Н. Мануилов², М. В. Морозкин¹

¹ Институт прикладной физики РАН, ЗАО НПП «ГИКОМ»;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Экспериментально исследована неадиабатическая электронная пушка, работающая в режиме ограничения тока пространственным зарядом, предназначенная для формирования винтовых пучков в гирорезонансных приборах. Полученные результаты подтверждают выводы проведённых ранее теоретических исследований: значения пичч-фактора и разброса скоростей электронов при большом токе пучка могут быть значительно улучшены по сравнению с традиционными адиабатическими системами.

ВВЕДЕНИЕ

Гиротроны с выходной мощностью от нескольких киловатт до нескольких десятков киловатт, работающие на частотах от 24 до 30 ГГц в настоящее время имеют множество научных и технологических приложений [1]. В отличие от гиротронов мегаваттного уровня мощности [2], используемых в установках термоядерного синтеза, технологические гиротроны работают при относительно низких ускоряющих напряжениях электронного потока — от 15 до 30 киловольт. В ИПФ РАН была предложена электронная пушка нового типа для гиротрона, имеющего рабочее напряжение на порядок ниже, чем в традиционных приборах [3]. Низкое рабочее напряжение позволяет существенно снизить массо-габаритные характеристики системы, упростить условия эксплуатации и исключить или снизить влияние вредных для человека сопутствующих паразитных факторов (таких, например, как рентгеновское излучение с коллектора). Это позволит существенно расширить область применения гирорезонансных приборов, удовлетворив существующие потребности высокочастотной обработки материалов, активной диагностики плазмы, спектроскопии, химии, медицины и др.

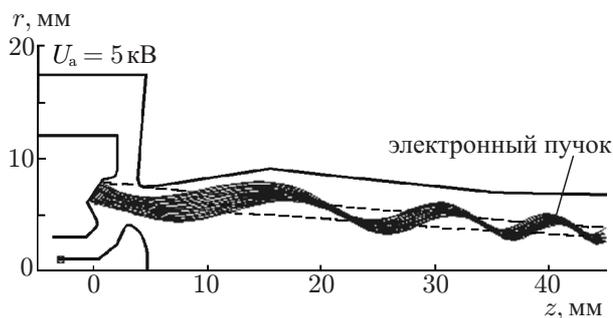


Рис. 1. Форма электродов (сплошные линии), силовые линии магнитного поля (пунктирные линии) и электронные траектории в диодном варианте неадиабатической магнетронно-инжекторной пушки

Предложенный в работе [3] гиротрон разрабатывался для работы при ускоряющих напряжениях 3÷5 кВ. Согласно результатам численного моделирования, сохранение выходной мощности на уровне нескольких киловатт и КПД на уровне 35 % может быть достигнуто за счёт использования неадиабатической электронной пушки, работающей в режиме ограничения тока пространственным зарядом. Инжектор пушки состоит из вогнутого кольцевого катода, часть которого покрыта эмитирующим слоем, и двух анодов — внутреннего и внешнего (рис. 1). Особенностью пушки является то, что оба анода создают примерно одинаковые электрические поля на по-

верхности эмиттера, т.е. расстояния от середины эмиттера до обоих анодов примерно одинаковые. Благодаря этому электрические поля на внешней и внутренней границах трубчатого пучка в области формирования различаются слабо, что приводит к снижению разброса скоростей электронов по сравнению с традиционными магнетронно-инжекторными пушками.

Кроме того, при работе в режиме полного пространственного заряда на поверхности виртуального катода электрическое поле равно нулю и мелкомасштабные неоднородности поверхности и эмиссионных свойств катода не играют роли при формировании пучка. Одной из существенных особенностей новой пушки, позволяющей частично перехватывать отражённые электроны, является близость электронных траекторий к внешнему аноду.

Согласно данным анализа траекторий, полученным с помощью программы EPOSR [4], в рассматриваемой пушке реализуется питч-фактор $g = 1,8$ при разбросе скоростей электронов $\delta v_{\perp} = 14\%$ [3]. Переванс пучка близок к $10 \text{ мкА/В}^{3/2}$, что примерно на порядок больше, чем в гиротронах с традиционными магнетронно-инжекторными пушками. Необходимо отметить, что относительно низкая частота генерации гиротрона и, соответственно, слабое магнитное поле на катоде, а также желание получить достаточно высокую мощность, т.е. ток пучка в несколько ампер, делают невозможным использование традиционной магнетронно-инжекторной пушки, хотя для частот около 250 ГГц и выходной мощности порядка 10 Вт (ток составлял доли ампера) она успешно использовалась при напряжениях 3,5 кВ [5].

Результаты численного моделирования показывают, что данный тип магнетронно-инжекторной пушки может быть успешно использован и для мощных гиротронов, применяемых в установках управляемого термоядерного синтеза. Например, для гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц можно подобрать геометрию электродов [6], обеспечивающую питч-фактор $g = 1,8$, разброс скоростей $\delta v_{\perp} \leq 14\%$ при напряжении и токе электронного пучка 80 кВ и 35 А соответственно, при том, что типичные параметры электронного пучка, формируемого традиционной магнетронно-инжекторной пушкой составляют $g \approx 1,3$ и $\delta v_{\perp} \approx 30\%$.

Целью данной работы была экспериментальная проверка возможности реализации расчётных параметров электронного пучка в предложенной электронно-оптической системе нового типа.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментального исследования описываемой электронно-оптической системы (рис. 2) был модифицирован анализатор, основанный на классическом методе тормозящего электрического поля [7] (рис. 3). Сформированный электронный пучок в области однородного магнитного поля проходит через сетку с варьируемым тормозящим потенциалом, что позволяет в предположении о моноэнергетичности исходного пучка по зависимости прошедшего через сетку тока от тормозящего напряжения построить функцию распределения электронов по скоростям и определить питч-фактор и скоростной разброс электронного пучка. В отличие от традиционного анализатора с секторными диафрагмами, расположенными в области нарастающего магнитного поля, в предлагаемой версии в качестве диафрагмы, снижающей ток на мишени, ограниченной тепловой нагрузкой, использован относительно



Рис. 2. Внешний вид низковольтной неадиабатической электронной пушки

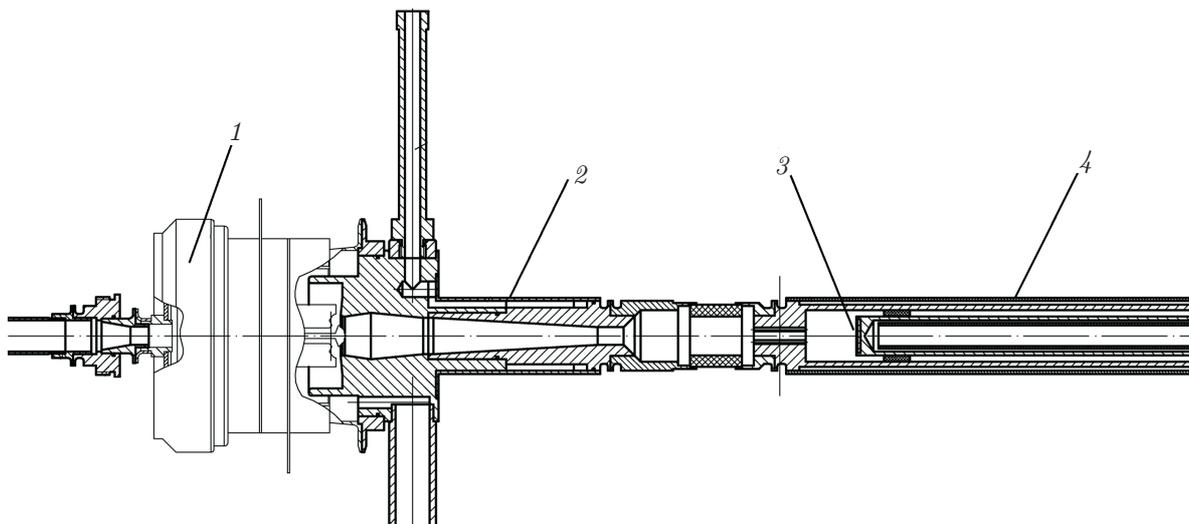


Рис. 3. Общий вид анализатора параметров электронного пучка: 1 — электронная пушка, 2 — корпус лампы, 3 — диафрагма и мишень, 4 — коллекторная область

длинный цилиндр, установленный в области однородного поля, с рядом отверстий, центры которых совпадают с радиусом ведущих центров электронных орбит, а диаметр несколько превосходит ларморовский радиус электронов в резонаторе.

Поскольку конструкция использованного анализатора не предусматривает эффективного охлаждения его компонентов (в первую очередь, диафрагмы, перехватывающей большую часть пучка), измерения параметров пучка при номинальных параметрах электронного пучка могли привести к перегреву элементов конструкции и разрушению прибора. Для снижения тепловой нагрузки эксперименты проводились в моделирующем режиме: ускоряющее напряжение V , ток пучка I и магнитное поле основного соленоида B были изменены по сравнению с параметрами основного режима (V_0 , I_0 , B_0) в соответствии с известными соотношениями подобия [8]: $V = V_0/k$, $I = I_0/\sqrt{k^3}$, $B = B_0/\sqrt{k}$, сохраняющими неизменными электронные траектории и параметры пучка по отношению к рабочему режиму. Коэффициент k был выбран равным 10; таким образом, при ускоряющем напряжении основного режима $V_0 = 5$ кВ эксперименты в моделирующем режиме проводились при напряжении на катоде 500 В. По снятой в эксперименте кривой отсечки определялись следующие характеристики электронного пучка: относительная осцилляторная энергия $t_{\perp} = (U_0 - U^{0,5})/U_0$ и разброс скоростей $\delta v_{\perp} = (U^{0,1} - U^{0,2})/[2(U_0 - U^{0,5})]$, где U_0 — ускоряющее напряжение, $U^{0,1}$, $U^{0,5}$ и $U^{0,9}$ — напряжения на сетке, соответствующие коллекторному току на уровнях 0,1; 0,5 и 0,9 от максимального соответственно.

В ходе экспериментального исследования электронно-оптической системы варьировались напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля в области формирования пучка.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первые эксперименты были проведены с диодным вариантом электронной пушки (рис. 1). Основным недостатком испытанной системы оказалось низкое токопрохождение электронного пучка — большая часть электронов перехватывалась внешним анодом. На основе экспериментальных данных и результатов численного моделирования движения электронов было сделано предположение о наличии паразитной эмиссии с участков катода, расположенных вблизи эмиссионного пояса. Для проверки этого предположения был выполнен тепловой расчёт средствами программы «QuickField» [9], позволивший смоделировать распределение температуры в элементах электронной пушки (рис. 4). По итогам расчётов на прилегающие к катоду области пушки

было нанесено антиэмиссионное покрытие с высокой работой выхода.

К сожалению, принятые меры не решили проблему низкого токопрохождения, до коллекторной области доходило примерно 20÷30 % электронов, вылетевших с катода. Следующим предположением было касание электронным пучком анода. Отклонение электронных траекторий от расчётных значений могло быть связано с неточностями установки элементов разборной лампы. Посредством численного моделирования программой EPOSR была выявлена высокая чувствительность к позиционному смещению элементов, как взаимному, так и во внешнем магнитном поле. В табл. 1 показано, насколько снижается качество электронного пучка разработанного технологического гиротрона при смещении эмитте-

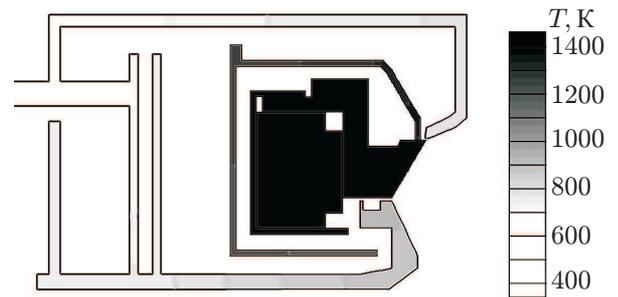


Рис. 4. Температурное поле на элементах конструкции катода

Таблица 1. Зависимость разброса скоростей электронов δv_{\perp} и питч-фактора g от смещения эмиттера относительно других элементов пушки Δz

| Δz , мм | δv_{\perp} | g |
|-----------------|--------------------|-----|
| 0,0 | 0,22 | 1,8 |
| 0,2 | 0,80 | 2,8 |
| -0,1 | 0,16 | 1,6 |

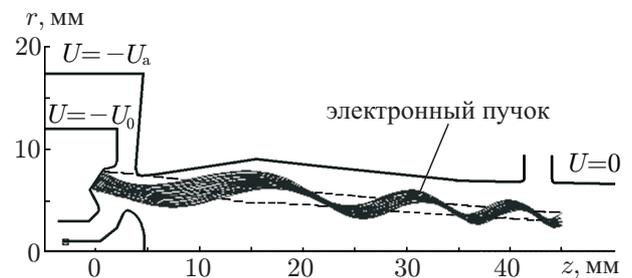


Рис. 5. Форма электродов (сплошные линии), их потенциалы, силовые линии магнитного поля (пунктирные линии) и электронные траектории в триодном варианте неадиабатической магнетронно-инжекционной пушки

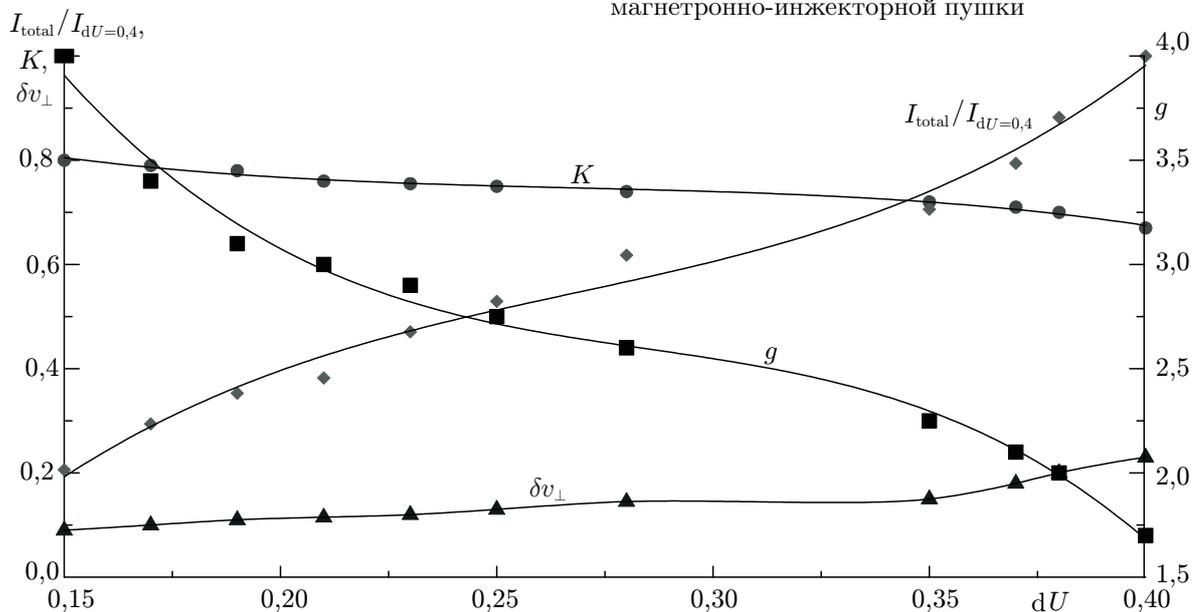


Рис. 6. Экспериментальные зависимости токопрохождения, питч-фактора, разброса скоростей электронов и полного тока катода I_{total} , нормированного на ток катода при $dU = 0,4$, от относительной разности потенциалов между катодом и анодом лампы $dU = (U_0 - U_a)/U_0$ в моделирующем режиме

ра вдоль оси симметрии лампы относительно остальных элементов пушки. Можно предположить, что при переходе в более высокочастотный диапазон критичность пушки к положению электродов будет слабее в силу меньшего масштаба электронной траектории.

Для проверки сделанного предположения и решения проблемы низкого токопрохождения было решено изменить форму внешнего анода, увеличив его радиус в месте близкого прохождения электронных траекторий. Одновременно с этим конфигурация электронной пушки была заменена на триодную (рис. 5) с появлением дополнительного управляющего электрода в месте возможного касания электронным пучком анода.

Результаты экспериментального исследования электронного пучка в окончательном варианте электронно-оптической системы представлены на рис. 6. Расчётному режиму соответствует анодное напряжение 300 В ($k = 10$). Из полученных данных следует, что можно получить достаточно большие значения пичч-фактора $g \approx 2,5$ при малой величине разброса скоростей электронов $\delta v_{\perp} \sim 10\%$ и приемлемом токопрохождении (отношение тока в резонаторе к току катода $K = I_{\text{cavity}}/I_{\text{cathode}} \approx 70\%$).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная низковольтная неадиабатическая электронно-оптическая система может быть использована и в технологических гиротронах средней мощности, и в мощных гиротронах для управляемого термоядерного синтеза. Несмотря на выявленную высокую чувствительность к позиционному смещению элементов, данная система позволяет получить пучок с существенно большей долей вращательной энергии электронов и меньшим разбросом скоростей по сравнению с традиционными магнетронно-инжекторными пушками, что позволяет рассчитывать на возможность реализации режимов с высоким КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. P. 67.
2. Denisov G. G., Litvak A. G., Myasnikov V. E., et al. // Nucl. Fusion. 2008. V. 48. Art. no. 054007.
3. Гольденберг А. Л., Глявин М. Ю., Завольский Н.А., Мануилов В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 835.
4. Krivosheev P. V., Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2001. V. 22. P. 1 119.
5. Hornstein M. K., Bajaj V. S., Griffin R. G., Temkin R. J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. V. 35. P. 27.
6. Гольденберг А. Л., Мануилов В. Н., Глявин М. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 6. С. 517.
7. Авдошин Е. Г., Гольденберг А. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 10. С. 1 605.
8. Запевалов В. Е., Куфтин А. Н., Лыгин В. К., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. С. 999.
9. <http://quickfield.com>.

Поступила в редакцию 27 июня 2011 г.; принята в печать 10 сентября 2011 г.

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ELECTRON OPTICAL SYSTEM
OF A LOW-VOLTAGE GYROTRON WITH A NONADIABATIC ELECTRON GUN**

M. Yu. Glyavin, A. L. Goldenberg, V. N. Manuilov, and M. V. Morozkin

We study experimentally the nonadiabatic electron gun which is operated in the regime of current limitation by the space charge and designed to form helical beams in gyroresonance devices. The obtained results confirm the conclusion of the earlier theoretical studies, namely, that in the case of a strong beam current, the values of the pitch factor and velocity spread of electrons can be improved significantly compared with the conventional adiabatic systems.