

12

## **Магнетронно-инжекторная пушка со сниженной температурой подогревателя и увеличенным временем жизни катода**

© М.Ю. Глявин, А.Д. Кунцевич, А.Г. Лучинин, В.Н. Мануилов,  
М.В. Морозкин, А.П. Фокин, М.Д. Проявин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
ЗАО НПП ГИКОМ, Нижний Новгород  
E-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 10 июля 2013 г.

Представлена электронно-оптическая система гиротрона, позволяющая осуществлять эффективный разогрев катода отраженными от магнитного зеркала электронами. При этом параметры первичного электронного потока сохраняются на уровне, приемлемом для эффективной генерации СВЧ мощности. Приводятся результаты тракторного анализа электронов и температурного режима катода. Соответствующее снижение мощности и температуры подогревателя катода позволяет рассчитывать на существенное (в несколько раз) увеличение срока службы подогревателя, являющегося одним из основных элементов, ограничивающих время жизни прибора.

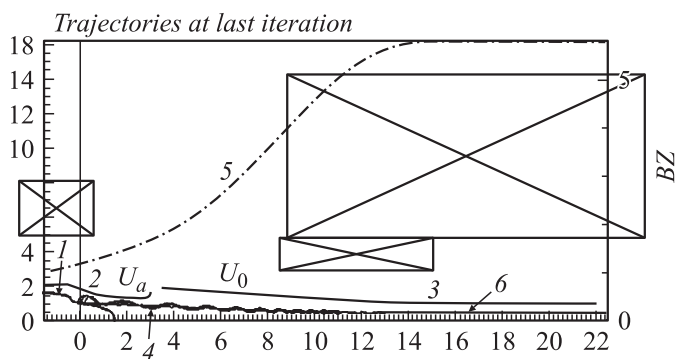
Интенсивное микроволновое излучение в диапазоне 20–200 GHz все более широко используется для электроно-циклотронного резонансного нагрева и управления током плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, высокотемпературной обработки материалов, выращивания алмазных пленок и дисков, создания пучков многозарядных ионов и др. [1–4]. Наиболее мощным и эффективным источником излучения в указанном диапазоне является гиротрон — электровакуумный прибор, основанный на индуцированном магнитотормозном излучении электронов, вращающихся в статическом магнитном поле [5]. Основными отличиями гиротрона от других мазеров на циклотронном резонансе является использование открытого высокоселективного резонатора с дифракционным выводом энергии и адиабатической магнетронно-

инжекторной пушки (МИП) с сильной компрессией электронного потока. Следует отметить, что сегодня существует явная тенденция к выдвигению на передний план не дальнейшего повышения мощности и эффективности — задач, превалировавших перед разработчиками в течение долгого времени, а создания дешевых, надежных, удобных в эксплуатации приборов с большим сроком жизни [6], поскольку для ряда современных технологических задач характерное время работы гиротрона в течение одного процесса может достигать сотен часов [3].

Созданные ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП ГИКОМ микроволновые комплексы на основе непрерывных гиротронов диапазона 24–30 GHz являются уникальными по своим функциональным возможностям [7–9] и используются научными центрами России, Японии, Европы, Китая для высокотемпературной микроволновой обработки материалов и создания пучков многозарядных ионов [2–4]. Известны примеры, когда время наработки гиротрона в этих комплексах достигало 7000 h работы под накалом [10], хотя определяемый производителем гарантийный срок службы составляет 1000 h. Для повышения срока службы и перехода в перспективе от лабораторного к промышленному применению технологических гиротронов требуется дальнейшее совершенствование катодного узла и в настоящее время этой проблеме уделяется серьезное внимание как в России, так и за рубежом (см., например, [11,12]).

Как известно, в гиротроне электроны движутся по винтовым траекториям, траектория ведущих центров которых совпадает с силовыми линиями магнитного поля. При этом в силу разброса скоростей электронов, являющегося неотъемлемой особенностью МИП [13], часть электронов с наибольшими вращательными скоростями отражается от магнитной пробки и возвращается в прикатодную область. Задачей исследования, результаты которого представлены в данной статье, был поиск геометрии электродов, при которой отраженные электроны бомбардировали бы поверхность катода вблизи эмиттера, тем самым способствуя дополнительному разогреву. При этом отраженный пучок не должен существенно влиять на разброс скоростей и долю вращательной энергии электронов, во многом определяющие КПД генерации.

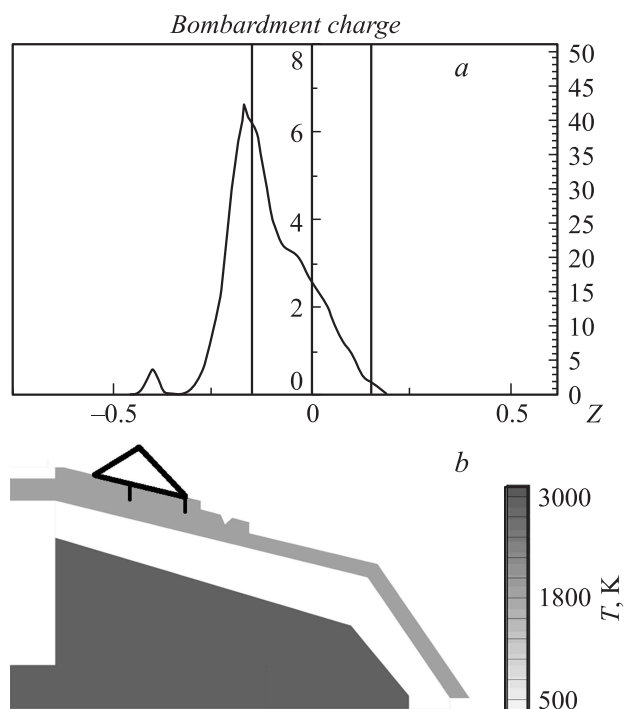
Решение задачи выполнялось циклическим выполнением двух шагов: расчетом параметров электронного потока, определением зоны бомбардировки и мощности отраженного пучка с помощью программы EPOSR-T [14], основанной на динамической аксиально-симметричной



**Рис. 1.** Общий вид электронно-оптической системы: катод (1), анод (2), заземленный корпус лампы (3), траектории электронов (4), распределение магнитного поля (5) и ход ведущей силовой линии магнитного поля (6), основной и дополнительный (в области катода) соленоиды. Размеры даны в сантиметрах.

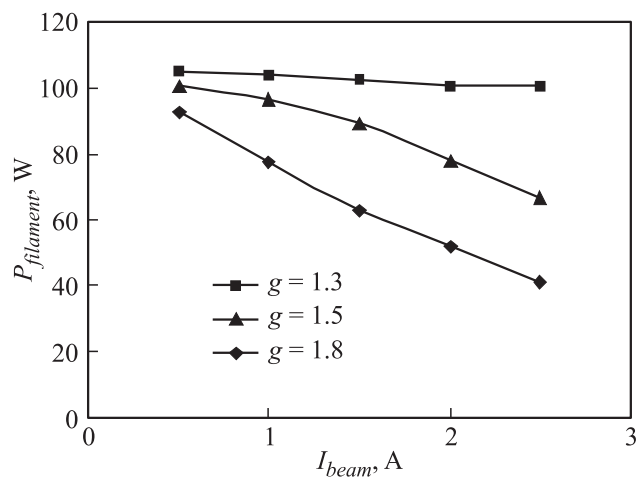
модели пучка; затем программой ELCUT 5.6 (в англоязычной версии QuickField) [15] осуществлялся расчет распределения температур на катоде и оценивалось снижение требуемой мощности подогревателя при сохранении эмиссионного тока. После этого изменялась форма электродов, вновь проводился траекторный анализ и т.д., вплоть до нахождения конфигурации электродов, позволяющей максимально снизить мощность подогревателя и сохранить параметры электронного потока, достаточные для реализации высокого КПД. Найденная геометрия электродов представлена на рис. 1, а распределение тока бомбардировки вдоль образующей эмиттера и тепловое поле катода — на рис. 2.

Поскольку распределение тока бомбардировки близко к несимметричному треугольнику, а энергия бомбардировки при изменении режима МИП меняется мало, то распределение мощности нагрева отраженными электронами также представляет собой несимметричный треугольник. Для численного моделирования дополнительный источник тепла задавался в виде гистограммы из 3 прямоугольников, расположенной в области бомбардировки. Из рис. 2, а можно видеть, что максимум бомбардировки приходится на область вне эмиттера, т.е. бомбардировка не может радикально повлиять на эмиссионные свойства катода. При расчете распределения температур задавались потери на излучение с



**Рис. 2.** Распределение бомбардирующих электронов вдоль образующей катода и их энергии (а). Распределение температур в катодном узле при бомбардировке катода отраженным потоком электронов (b). Треугольником отмечена зона бомбардировки. Вертикальные линии обозначают границы эмиттера.

катода и граничное условие в виде постоянной температуры внешнего анода, охлаждаемого проточной водой. Константы для моделирования поля температур подбирались таким образом, чтобы в отсутствие бомбардировки получить температуру катода, равную измеренной пирометрическим методом в испытательном стенде при заданной мощности подогревателя. Температурное поле на эмиттере при мощности электронной бомбардировки 29.2 W приведено на рис. 2, b. Неоднородность нагрева эмиттирующего пояса вследствие бомбардировки отраженными электронами не превышает 5 K. Мощность подогревателя в этом



**Рис. 3.** Зависимость мощности подогревателя катода от тока электронного пучка для различных значений питч-фактора  $g$ .

случае снижается на 38% (со 106 до 65 W), а совместное воздействие подогревателя и бомбардировки обеспечивает необходимую рабочую температуру эмиттера ( $\sim 1800$  K).

Используя рассчитанную мощность бомбардировки катода для различных питч-факторов  $g = V_{\perp}/V_{\parallel}$  ( $V_{\perp}$  и  $V_{\parallel}$  — вращательная и продольная компоненты скорости электронов соответственно), можно вычислить снижение мощности подогревателя в зависимости от тока пучка (рис. 3) при сохранении параметров электронного потока, обеспечивающих требуемые КПД и мощность излучения гиротрона. Следует отметить, что типичные значения питч-фактора редко превышают 1.5 (в отдельных случаях 1.7–1.8), поскольку при больших значениях  $g$  и типичных значениях скоростного разброса в МИП резко растет число отраженных электронов, что, как правило, приводит к развитию неустойчивостей электронного пучка.

Для экспериментальной проверки возможности снижения накала при бомбардировке катода отраженным электронным пучком был проведен эксперимент с непрерывным гиротроном с рабочей частотой 28 GHz. Геометрия пушки специально не оптимизировалась, использовалась стандартная промышленная лампа, и задачей было

зафиксировать принципиальную возможность снижения тока накала при появлении бомбардировки с ростом пичч-фактора и сохранении постоянных значений тока пучка, мощности и эффективности генерации. Величина пичч-фактора регулировалась дополнительным соленоидом, размещенным в области катода ( $V_{\perp} \sim E/B$ ,  $E$  и  $B$  — напряженность электрического и интенсивность магнитного поля на катоде соответственно). Максимальное снижение мощности подогревателя в эксперименте составило 22% для тока электронного пучка 1.5 А, что свидетельствует о правильности предлагаемого подхода.

Нагрев катода потоком отраженных электронов позволяет снизить мощность подогревателя катода и соответственно уменьшить рабочую температуру подогревателя, что должно отразиться на изменении его срока службы. Чем выше температура подогревателя, тем выше скорость испарения его материала и соответственно меньше его время жизни. Долговечность подогревателя принято определять временем, в течение которого его объем уменьшается на 10%; естественно, полное время жизни может быть существенно больше. Оценим изменение долговечности нагревателя за счет снижения его рабочей температуры. В гиротроне с рабочей частотой 28 GHz при токе пучка 2 А усредненный расчетный пичч-фактор электронов равен  $g \sim 1.35$ , соответственно мощность нагрева катода отраженными электронами (рис. 3) составляет около 10 W. Воспользовавшись формулой [16,17] для оценки долговечности нагревателя  $t_{\max} = 8.45 \cdot 10^{-3} \frac{d}{M_1 \beta}$ , где  $d$  — диаметр нагревателя,  $M_1$  — скорость испарения материала нагревателя с поверхности единичного цилиндра, gr/s,  $\beta$  — коэффициент, зависящий от температуры и режима эксплуатации (в нашем случае при поддержании постоянной температуры нагревателя  $\beta = 1$ ), можно сравнить долговечность катода в режимах с бомбардировкой и без нее. Без бомбардировки температура подогревателя катода составляет 3300 K, что дает долговечность около 200 h, а наличие бомбардировки позволяет снизить температуру нагревателя до 3100 K, что увеличивает долговечность втрое — до 600 h.

Конечно, сделанные оценки весьма приблизительны, кроме того, температура катода и подогревателя в составе прибора может отличаться от измеренной при пирометрировании, так как наличие анода и других конструктивных элементов гиротрона может влиять на распределение температуры на поверхности катода. Если температура подогревателя 3000 K, а ее снижение из-за бомбардировки вновь состав-

ляет величину порядка 200 К, описанный механизм даст еще больший выигрыш в долговечности — в 6–7 раз.

## Список литературы

- [1] *Denisov G.G., Litvak A.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Zapevalov V.E.* // Nuclear Fusion. 2008. V. 48. N 1. P. 054007 (1–5).
- [2] *Rybakov K.I., Semenov V.E., Egorov S.V., Ereemeev A.G., Plotnikov I.V., Bykov Yu.V.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 023506 (1–9).
- [3] *Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V., Koldanov V.A., Litvak A.G., Ovechkin N.M., Radishev D.B., Bykov Yu.V., Caplan M.* // Diamond and Related Materials. 2006. V. 15. P. 502–507.
- [4] *Golubev S., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Skalyga V., Vodopyanov A., Zorin V., Bokhanov A.* // Nucl. Instr.& Meth. in Phys. Res. B. 2007. V. 256. P. 537–542.
- [5] *Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V., Goldenberg A.L., Petelin M.I., Usov V.G., Yulpatov V.K.* // Infrared Phys. 1978. V. 18. N 6. P. 385–393.
- [6] *Zapevalov V.E.* // Radiophys. Quantum Electron. 2011. V. 54. N 8–9. P. 507–518.
- [7] *Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashiev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2004. V. 32. N 1 P. 67–72.
- [8] *Morozkin M.V., Glyavin M.Yu., Denisov G.G., Luchinin A.G.* // Int. J. IRMM Waves. 2008. V. 29. P. 1004–1010.
- [9] *Glyavin M., Luchinin A., Morozkin M.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 074706 (1–3).
- [10] *Idehara T., Mitsudo S.* Research Center for Development on Far-Infrared Region. University of Fukui, Fukui, Japan, private communications.
- [11] *Malygin A., Illy S., Pagonakis I., Posczyk B., Kern S., Weggen J., Thumm M., Jelonnek J., Avramides K., Ives L., Marsden D., Collins G.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41, in print.
- [12] *Pilossof M., Einat M.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2011. V. 636. P. 8–12.
- [13] *Tsimring Sh.E.* // Radiophys. Quantum Electron. 1972. V. 15. N 8. P. 952–961.
- [14] *Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E.* // Int. J. of IRMM Waves. 2001. V. 22. N 8. P. 1119–1145.
- [15] <http://quickfield.com/>
- [16] *Царев Б.М.* Расчет и конструирование электронных ламп. М.: Госэнергоиздат, 1961.
- [17] *Кноль М., Эйхметер И.* Техническая электроника Т.1. М.: Энергия, 1971.