УДК 621.385.69

Магнетронно-инжекторная пушка для квазиоптической гиро-ЛОВ с октавной полосой перестройки частоты

И.Г. Гачев ¹, М.В. Каменский ¹, К.А. Лещева ^{1,2}, С.В. Самсонов ¹

¹Институт прикладной физики РАН ²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: В работе представлены результаты расчета магнетронно-инжекторной пушки (МИП), разработанной для использования в первых экспериментах по исследованию недавно предложенного варианта гиротронной лампы обратной волны (гиро-ЛОВ). Спецификой МИП является необходимость работы в очень широком диапазоне магнитных полей (от 4 до 8 Тл в области взаимодействия). В результате синтеза найдена 3-х электродная конфигурация пушки, обеспечивающая согласно 2- и 3-мерным расчетам, электронный пучок необходимой геометрии с энергией частиц около 21 кэВ, током 2.5 А, питч-фактором частиц до 1.7 и приемлемым скоростным разбросом во всем диапазоне перестройки магнитного поля с подстройкой напряжения на управляющем электроде.

Ключевые слова: гиротронная лампа обратной волны (гиро-ЛОВ), магнетронно-инжекторная пушка (МИП), магнитная перестройка частоты генерации

1. Введение

Гиротронная лампа обратной волны (гиро-ЛОВ) является разновидностью мазера на циклотронном резонансе (МЦР), отличающейся от гиротрона (наиболее развитого варианта МЦР) потенциальной возможностью существенно более широкополосной плавной перестройки частоты генерации. В обычных гиро-ЛОВ на основе отрезка гладкого волновода перестройка частоты, как правило, является кусочно-непрерывной с сильными вариациями мощности и пространственной структуры выходного излучения.

Сравнительно недавно в ИПФ РАН предложена концепция этого прибора, основанная на использовании в качестве электродинамической системы отрезка открытой квазиоптической зеркальной линии передачи, в которой гауссов волновой пучок направляется зеркалами по зигзагообразной траектории, так что его периодические пересечения с электронным потоком происходят под прямым углом [1]. Как показывают расчеты, такая конфигурация позволяет в значительной степени преодолеть недостатки обычных гиро-ЛОВ и реализовать генератор с плавной перестройкой частоты магнитным полем в диапазоне более одной октавы и выходом излучения в виде гауссова волнового пучка.

Как показало 3-мерное PIC (Particle-In-Cell) моделирование, такая квазиоптическая гиро-ЛОВ может запитываться типичным для гиротронов трубчатым электронным пучком, средний радиус которого во много раз превышает радиус циклотронных орбит, а радиальная ширина пучка может составлять несколько ларморовских радиусов.

В настоящее время для экспериментальной проверки основных теоретических выводов разрабатывается проект такого прибора, адаптированного под использование имеющегося сверхпроводящего магнита и высоковольтных источников питания.

В данной работе обсуждается один из ключевых элементов разрабатываемой гиро-ЛОВ – система формирования электронного пучка, т.н. электронная пушка. Расчетная геометрия пучка в области взаимодействия, необходимая величина питч-фактора (отношение вращательной и поступательной скоростей электронов) и допустимый скоростной разброс делают наиболее адекватным выбор электронно-оптической системы (ЭОС) в виде т.н. магнетронно-инжекторной пушки (МИП), типичной для большинства гиротронов [2, 3]. Существенной особенностью МИП в рассматриваемом случае является то, что она должна работать в очень широком (октавном) диапазоне магнитных полей (максимальное значение больше минимального в 2 раза). Ранее в ряде экспериментов по исследованию ступенчатой широкополосной перестройки частоты в гиротроне (см., напр., [4]) было показано, что МИП с дополнительным управляющим электродом позволяет формировать адекватный электронный пучок при почти октавной перестройке величины магнитного поля. Однако мощность электронного пучка в тех экспериментах была существенно ниже мощности, требуемой для реализации нашего прибора. Кроме того, заданная геометрия криомагнита и специфические требования к параметрам электронного пучка приводят к необходимости синтеза новой МИП практически «с нуля».

2. Требования к электронному пучку и предварительный анализ МИП

Расчеты гиро-ЛОВ для запланированного эксперимента с учетом использования имеющегося сверхпроводящего магнита и высоковольтных источников питания определили требования к электронному пучку в области взаимодействия: энергия частиц – около 21 кэВ, ток – 2.5 А, питч-фактор $g = v_{\perp}/v_{||} = 1.6-1.7$, радиус пучка – 1.75–2.25 мм во всем диапазоне значений магнитного поля $B_0 = 4-8$ Тл.

В качестве остальных ограничений на параметры ЭОС гиро-ЛОВ, учитываемых при ее разработке, можно выделить величину электрического поля на катоде и плотность тока термоэмиссии, которые не должны превышать 5 кВ/мм и 3 А/см², соответственно.

Оценка величины ларморовского радиуса электронов в поле 8 Тл (0,05 мм) делает возможным использование адиабатической МИП для формирования требуемого электронного пучка.

Первоначальные оценки параметров МИП были выполнены в соответствии с результатами адиабатической теории [3], [5]. В частности, была выбрана величина компрессии магнитного поля (отношение поля в области взаимодействия к полю на катоде) α =26, радиус центра эмиттера R_c =10 мм и расстояние между эмиттером и ближайшей точкой анода d_{C-A} =5 мм. В соответствии с результатами [6] угол наклона эмиттера к оси магнитной системы был выбран равным Ψ =26°, что гарантировало формирование ламинарного ВЭП в прикатодной области пушки, и обеспечивало уменьшение влияния сил пространственного заряда как на падение питч-фактора, так и на увеличение скоростного разброса.

Как было отмечено во введении, для обеспечения работы пушки в октавном диапазоне магнитных полей (4–8 Тл) была выбрана конструкция МИП с изолированным первым анодом, когда потенциал ближайшего к катоду электрода U_{anode1} меньше потенциала последующего электрода U_{anode2} , который сохраняется постоянным и определяет (с учетом кулоновского «провисания» потенциала) энергию частиц в пространстве взаимодействия (Рис. 1). При этом поперечная скорость электронов в области катода, приобретаемая ими за счет действия силы, пропорциональной отношению скрещенных радиального электрического и продольного магнитного полей, сохраняется постоянной, если при уменьшении магнитного поля одновременно снижается потенциал U_{anode1} .



Рисунок 1. Конфигурация 3-х электродной МИП: катод показан красным цветом, эмитирующий поясок – светло-желтым. Фиолетовым цветом обозначены изоляторы.

3. Результаты численного моделирования МИП

Далее в рамках численного моделирования производилась вариация формы катода и первого анода МИП (с контролем электропрочности) с целью получения заданной величины питч-фактора электронов при малом скоростном разбросе, обусловленном конечной шириной эмиттера.

В частности, использование простого конического анода, параллельного катоду приводило к большому разбросу скоростей и снижению питч-фактора. Дальнейшая оптимизация формы анода путем организации раскрыва анодного конуса в сторону левой границы эмиттера, с учетом максимально допустимого электрического поля на катоде $E_k \leq 5$ кВ /мм, позволила уменьшить скоростной разброс и обеспечить достаточно большие величины питч-фактора. За счет оптимизации формы анода вблизи эмиттера удалось заметно увеличить площадь эмитирующей поверхности (длина эмитирующего кольца составляет 4 мм) при сохранении приемлемой величины скоростного разброса, так что при полном токе 2.5 А нагрузка на эмиттер составляет всего 1.0 А/см², что является положительным фактором для обеспечения устойчивой и долговременной работы термокатода.

Согласно расчетам, скоростной разброс в оптимизированном варианте МИП остается малым и слабо зависит от тока пучка.

Трехмерный траекторный анализ проводился с помощью программного пакета CST Particle Studio [7] в пространстве от эмиттера до области взаимодействия для двух крайних значений магнитного поля 4 и 8 Тл. Традиционно анализ ЭОС ведется до некоторого промежуточного сечения вдоль оси магнитной системы, после чего параметры пучка в рабочем пространстве лампы пересчитываются в соответствии с адиабатической теорией. Проведение расчетов вплоть до центра резонатора позволило вычислять осцилляторные скорости электронов и радиус электронного пучка с более высокой точностью.

Как показали результаты трехмерного моделирования, в предложенной МИП возможно получение требуемой величины питч-фактора 1.6-1.7 при токе пучка 2.5 А на всём участке перестройки по магнитному полю.

Теоретическое исследование синтезированной МИП было выполнено также с помощью программы ANGEL [8], позволяющей осуществлять траекторный анализ осесимметричных ЭОС с учетом пространственного заряда пучка (Рис. 2). Уменьшение размерности модели с 3D до 2D позволяет существенно уменьшить требования к компьютерным ресурсам и на порядки сократить время расчета. Результаты расчета данной МИП программой ANGEL по интегральным характеристикам пучка оказались достаточно близки к результатам 3D моделирования.



Рисунок 2. Расчеты МИП в программе ANGEL: а) геометрия электродов и продольное распределение магнитного поля; б) траектории выборочных частиц в прикатодной области.

Использование «быстрого» 2D анализа позволило выполнить расчеты для большого количества дискретных значений магнитного поля и напряжения на управляющем аноде U_{anodel} и построить двумерную карту рабочих параметров МИП, определяющую величину анодного напряжения, необходимую для достижения заданного значения питч-фактора электронов при заданной величине магнитного поля (Рис. 3). Согласно расчетам, практически во всем требуемом диапазоне магнитных полей за счет подстройки величины U_{anodel} от 12 до 22 кВ можно обеспечить достижение рабочей величины питч-фактора электронов в диапазоне g=1.5 - 1.7. При этом среднеквадратичное значение разброса поперечных скоростей не превышает 4% при значении магнитного поля выше 5 Тл.



Рисунок 3. Напряжение на управляющем электроде, необходимое для достижения питчфактора 1.5; 1.6 и 1.7 (синяя, красная и зеленая линии, соответственно), в зависимости от величины магнитного поля в области взаимодействия. Пунктирными линиями показана величина разброса поперечных скоростей.

4. Заключение

Разработана 3-х электродная магнетронно-инжекторная пушка, обеспечивающая согласно 2- и 3-мерным расчетам, электронный пучок радиусом около 2 мм с энергией частиц около 21 кэВ, питч-фактором до 1.7, током 2.5 А и скоростным разбросом менее 7% в диапазоне перестройки магнитного поля от 4 до 8 Тл. Разработанную МИП планируется изготовить и использовать в первых экспериментах по исследованию недавно предложенного квазиоптического варианта гиро-ЛОВ с октавной (от 110 до 220 ГГц) перестройкой частоты генерации при киловаттном уровне выходной мощности.

Исследование выполнено за счёт **гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00443).**

Список литературы

- 1. Samsonov S.V. et al. Cyclotron resonance maser with zigzag quasi-optical transmission line: concept and modeling // IEEE Trans. Electron Devices. 2021. V. 68. № 11. P. 5846–5850.
- 2. Гольденберг А.Л., Петелин М.И. Формирование винтовых электронных пучков в адиабатической пушке // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 1. С. 141–149.
- Цимринг Ш. Е. Формирование винтовых электронных пучков В кн.: Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров). Кн. 4. – Саратов: СГУ, 1974. – С. 3–94.
- 4. Hong K.D., Brand G.F. and Idehara T. A 150–600 GHz step-tunable gyrotron // Journal of Applied Physics. 1993. V. 74. № 8. P. 5250–5258.
- 5. Tsimring Sh. E. Electron beams and microwave vacuum electronics Hoboken, New Jersey: Wiley Interscience, 2007.
- 6. Цимринг Ш.Е. О разбросе скоростей в винтовых электронных пучках // Изв. вузов. Радиофизика. 1972. Т. 15. № 8. С. 1247–1258.
- 7. https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/.
- Семёнов Е.С., Планкин О.П., Розенталь Р.М. Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии // Известия ВУЗОВ. Прикладная нелинейная динамика. – 2015. – Т. 23. – № 3. – С. 94–105, ANGEL 2DS Program Package for Gyrotron Gun Modeling: User's Guide. Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2011.