

**Лещева К.А.^{1,2}, Гольденберг А.Л.¹, Глявин М.Ю.¹,
Куфтин А.Н.¹, Мануилов В.Н.^{1,2}**

¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Неадиабатическая электронно-оптическая система для 170ГГц/1 МВт непрерывного гиротрона

Разработана методика анализа режимов работы, оптимизации геометрии электродов и параметров магнитной системы для неадиабатических электронно-оптических систем (ЭОС) гиротронов различных частотных диапазонов. Эффективность методики проиллюстрирована на примере расчета ЭОС 170 ГГц гиротрона, предназначенного для экспериментов по нагреву плазмы и управления током в установках УТС. Численными методами выполнена оптимизация геометрии электродов и магнитной системы, позволившая сформировать винтовой электронный пучок (ВЭП) со значительно меньшим разбросом осцилляторных скоростей, чем в традиционных адиабатических ЭОС, что делает возможным существенное повышение КПД гиротрона. Изучено влияние погрешностей изготовления и юстировки ЭОС, а также вариаций тока и напряжения на параметры формируемого ВЭП.

Ключевые слова: Гиротрон, винтовой электронный пучок, неадиабатическая электронная пушка.

Традиционно для формирования винтового электронного пучка (ВЭП) [1] в гиротронах применяются адиабатические магнетронно-инжекторные пушки (МИП) [2], работающие в режиме температурного ограничения эмиссии. Особенностью МИП является то, что вследствие адиабатичности формирующих полей на качество ВЭП и прежде всего на скоростной разброс сильное влияние оказывают тепловые скорости и шероховатость поверхности эмиттера. Эти факторы разброса тем значительней, чем короче рабочая длина волны гиротрона и приводят к значительному снижению электронного КПД уже в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Как известно, помимо адиабатической схемы формирования ВЭП, возможно формирование винтовых пучков и в неадиабатических полях. В этом случае первоначально формируется прямолинейный пучок и только на второй стадии формирования электроны приобретают вращательную скорость. Формирование прямолинейного пучка делает тепловые скорости и шероховатость поверхности эмиттера факторами второго порядка малости и поэтому позволяет практически исключить их влияние на параметры ВЭП и за счет этого значительно увеличить максимально допустимую долю колебательной энергии в пучке, а значит – и КПД, особенно в гиротронах коротковолнового диапазона [3].

В данной работе рассмотрена возможность создания неадиабатической системы для 170ГГц/80кВ/30А гиротрона. В неадиабатической электронной пушке, в начале, формируется прямолинейный пучок. Электроны приобретают первичную осцилляторную скорость v_{\perp} за счет инжекции пучка под углом Ψ к магнитному полю. Требуемая величина Ψ обеспечивается установкой пары встречных симметричных катушек, расположенных по обе стороны от плоскости эмиттера, меняющих радиальную компоненту магнитного поля.

Далее, v_{\perp} возрастает в плавно нарастающем магнитном поле до требуемой величины, как и в адиабатической системе формирования [4]. Достоинством такой схемы формирования является возможность независимого управления питч-фактором при сохранении положения пучка в резонаторе гиротрона.

Найдена оптимальная конфигурация катодных катушек, обеспечивающая минимальные энергозатраты при заданной величине Ψ . Для предварительного расчета положения пушки в магнитном поле, величины угла Ψ и межэлектродных расстояний, использованы простые аналитические формулы, основанные на модели инжекции пучка под углом к магнитному полю, законе сохранения энергии, теореме Буша и законе сохранения поперечного адиабатического инварианта в переходной области после завершения процесса первичной накачки осцилляторной скорости. Даны рекомендации по предварительному выбору формы катода, обеспечивающей близкие углы инжекции электронов в магнитное поле, что позволяет снизить разброс вращательных скоростей электронов.

Окончательная геометрия неадиабатической электронно-оптической системы и токи катодных катушек (рис.1) были определены на основе численного моделирования. Оптимизация проводилась с помощью программных пакетов ЭПОС [5] и CST STUDIO SUITE [6]. Численные расчеты позволили найти электродную конфигурацию, обеспечивающую хорошую электропрочность пушки. Результаты моделирования показали, что использование данной неадиабатической схемы формирования винтового электронного пучка в 170ГГц/80кВ/30А гиротроне позволяет устранить влияние на величину скоростного разброса таких критически важных для гиротронов факторов как условия на поверхности эмиттера и становится возможным получение питч-фактора вплоть до 2 и величины скоростного разброса менее чем 20% по сравнению с соответствующими типичными значениями 1.2-1.3 и 25-30% для адиабатических МИП. Таким образом, возможно увеличение КПД примерно в 1.3 раза.

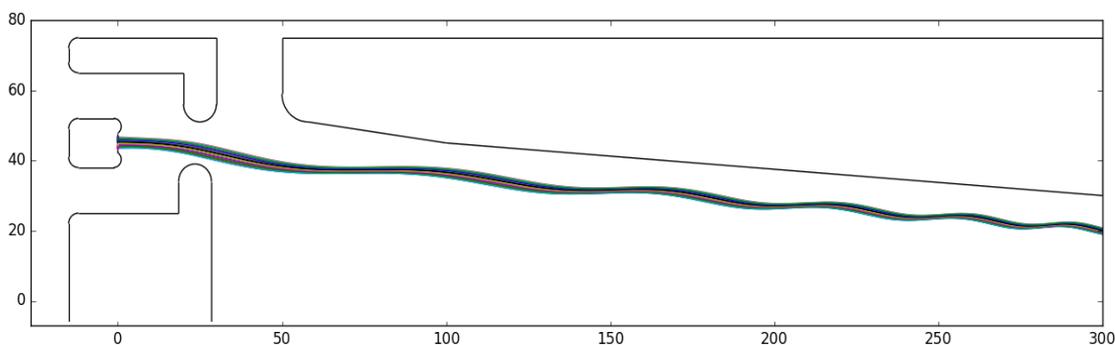


Рис. 1. Схема триодной неадиабатической электронно-оптической системы для 170ГГц/80кВ/30А гиротрона.

Библиографический список

1. Sh.E.Tsimring *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience. 2007. 573 p.
2. M.Thumm, *State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2013)*. KIT Scientific Reports. 2014. vol. 7662 (KIT Scientific Publishing). pp. 1-138.
3. А.Л.Гольденберг, В.Н.Мануилов, М.Ю.Глявин. Электронно-оптическая система мощного гиротрона с неадиабатической электронной пушкой. *Изв. вузов Радиофизика*. 2005. Т. 48, №6. С.517-522.
4. А.Л.Гольденберг, М.И.Петелин Формирование винтовых электронных пучков в адиабатической пушке. *Изв. вузов Радиофизика*. 1973. Т. 16, №1. С. 141-149.
5. P.V.Krivosheev, V.K.Lygin, V.N.Manuilov, Sh.E.Tsimring. Numerical Simulation Models of Focussing Systems of Intense Gyrotron Helical electron Beams. *Int. J. of Infrared and MM waves*. 2001. vol.22, No 8. pp.1119-1146.
6. CST STUDIO SUITE www.cst.com