

**Гольденберг А.Л.¹, Глявин М.Ю.^{1,2}, Лещева К.А.²,
Мануилов В.Н.^{1,2}, Уткина И.Е.³**

¹ Институт прикладной физики РАН

² ННГУ им. Н. И. Лобачевского

³ Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

Параметры винтового электронного пучка, формируемого в неадиабатической электронной пушке гиротрона

Представлены результаты численных исследований нового варианта неадиабатической системы формирования винтового электронного пучка (ВЭП) для гиротронов, в которой электроны приобретают первичные осцилляторные скорости при инжекции прямолинейного пучка под углом к магнитному полю. В такой электронной пушке влияние тепловых скоростей электронов и шероховатости эмиттирующей поверхности может быть уменьшено по сравнению с традиционными электронно-оптическими системами гиротронов, что делает возможным существенное повышение КПД. Рассмотрены основные факторы, влияющие на качество формируемого ВЭП.

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

В гиротронах, наиболее мощных источниках электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн от миллиметрового до субмиллиметрового [1], в качестве активной среды (источника энергии излучения) используются трубчатые пучки электронов, движущихся по винтовым траекториям в постоянном магнитном поле (так называемые винтовые электронные пучки - ВЭП)[2,3]. Для формирования ВЭП применяются магнетронно-инжекторные пушки (МИП), 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. Таким образом, хотя МИП используются во всех мощных гиротронах вплоть до мегаваттного уровня выходной мощности, они имеют серьезные недостатки. Действие указанных выше факторов может быть в значительной степени нивелировано при использовании неадиабатических электронных пушек [4], где эти факторы вносят возмущение в распределение компонент скоростей электронов только как величины второго порядка малости и при потенциале анодов порядка и выше 10 кВ их вклад оказывается малым.

В данной работе приведены результаты численного анализа и оптимизации геометрии неадиабатической низковольтной (15 кВ, 3А) электронно-оптической системы для гиротрона с рабочим магнитным полем 6.5 кГс. Рассматриваемая неадиабатическая пушка (рис.1) может работать в диодном ($U_0 = U_a$) или триодном ($U_0 > U_a$) режиме. Первый анод пушки состоит из двух частей – внешнего анода, охватывающего кольцевой катод, и внутреннего. Электронный пучок инжектируется через кольцевую щель между охватывающим и внутренним анодами.

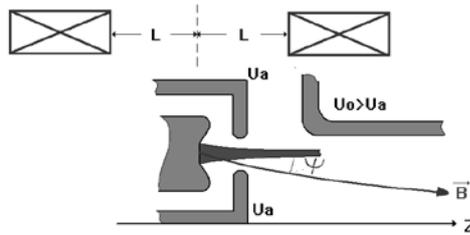


Рис. 1. Схема триодной неадиабатической ЭОС. U_a – потенциал первого анода, U_o – потенциал резонатора относительно катода, ψ – угол между электронным пучком и магнитным полем. Симметрично относительно центра эмиттера на расстоянии L расположены две встречные катушки для регулировки величины g

Данная электронно-оптическая система носит название кольцевой инжекторной пушки (КИП). В КИП электроны разгоняются до анодного потенциала U_a в магнитном поле, составляющем угол ψ с электрическим полем на катоде. Величина магнитного поля должна быть такой, чтобы электроны двигались в сильном электрическом поле вплоть до щелевого зазора в составе почти прямолинейного пучка и только затем отклонялись магнитным полем. Иначе говоря, время пролета электрона от катода до кольцевого зазора не должно превышать $1/4$ циклотронного периода в прикатодном поле B_k . Тогда электроны приобретают первичную осцилляторную скорость примерно равную $\sin \psi \times v_a$, где $v_a = \sqrt{2\eta U_a}$, которая затем возрастает в нарастающем магнитном поле, как и в адиабатической системе формирования пучка [5]. При этом факторы разброса осцилляторных скоростей, связанные с начальными условиями движения электронов, такие как шероховатости поверхности эмиттера, тепловые скорости электронов и неоднородности эмиссионных характеристик, вносят в распределение скоростей возмущение второго порядка малости, а не первого, как в МИП [3]. Кроме того, благодаря выравниванию электрических полей на внутренней и внешней границах электронного пучка в области его начального формирования, возможно значительно уменьшить влияние пространственного заряда пучка на разброс скоростей. Это позволяет при оптимизации формы электродов достигнуть в КИП более высокого качества ВЭП.

Для регулировки угла ψ и, соответственно, питч-фактора g в магнитной системе использована пара включенных навстречу друг другу дипольных катушек, позволяющая варьировать величину ψ без изменения компрессии пучка. Предлагаемая схема ЭОС является дальнейшим развитием работ [4,6,7] и отличается конфигурацией электродов и использованием дипольных катушек, что позволяет существенно ослабить требования к точности изготовления и сделать более гибким управление параметрами ВЭП, прежде всего, питч-фактором. Результат численных расчетов, проведенных в программе ЭПОС [8] показали, что использование данной неадиабатической схемы формирования винтового электронного пучка (см. рис.1,2) в гиротронах позволяет устранить влияние на величину скоростного разброса таких критически важных для гиротронов факторов как условия на поверхности эмиттера. В результате становится возможным увеличение питч-фактора электронного пучка до 1.7, что способствует увеличению выходного КПД, улучшению устойчивости одномодовой генерации, снижению омических потерь и повышению эффективности систем рекуперации энергии. В данной системе возможно независимое изменение напряжения и тока пучка, а также питч-фактора в широких пределах при неизменном радиусе ВЭП в рабочем пространстве гиротрона.

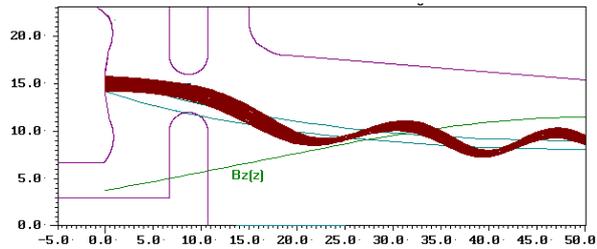


Рис.2. Конфигурация электродов КИП, электронные траектории и распределение осевого магнитного поля.

Рассмотрены причины увеличения разброса компонент скоростей электронов с ростом тока пучка. Показано, что при больших токах основным фактором разброса является действие резонансного механизма изменения осциллирующих скоростей в области регулярных взаимных пересечений электронных траекторий. Компенсация поля пространственного заряда пучка ионным фоном позволяет подавить эту неустойчивость.

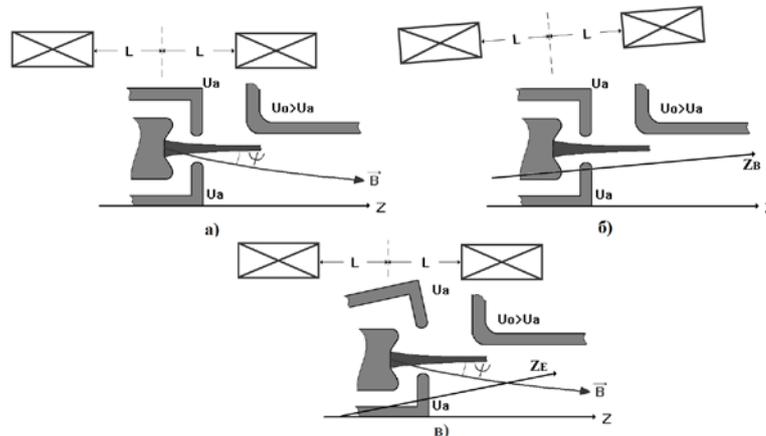


Рис.3. К расчету 3-мерных возмущений качества ВЭП: а) исходная геометрия б) поворот оси магнитного поля относительно оси системы, в) поворот анода относительно оси системы

На базе пакета CST Studio Suite проанализировано влияние трехмерных возмущений геометрии ЭОС, возникающих при смещении или наклоне осей (рис.3), найдены допуски, обеспечивающие приемлемое качество ВЭП.

Библиографический список

1. M.Thumm, State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2013), KIT Scientific Reports, vol. 7662 (KIT Scientific Publishing), pp. 1-138, 2014.
2. A.L.Goldenberg, M.I.Petelin Formation of helical electron beams in adiabatic gun, Radiophysics and Quantum Elec-tronics, vol.16, No 6, 1973, pp. 141-149
3. Sh.E.Tsimring Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Wiley-Interscience, 2007, 573 p.
4. A.L.Goldenberg, V.N.Manuilov and M.Yu.Glyavin Electron-Optical System of a High-Power Gyrotron with Nonadiabatic Electron Gun, Radiophysics and Quantum Electronics, vol.48, No 6, 2005, pp. 461-465
5. A.L.Goldenberg, M.I.Petelin Formation of helical electron beams in adiabatic gun, Radiophysics and Quantum Electronics, vol.16, No 6, 1973, pp. 141-149
6. М.Ю.Глявин, А.Л.Гольденберг, В.Н.Мануилов, М.В.Морозкин. Экспериментальное исследование электронно-оптической системы низковольтного гиротрона с неадиабатической электронной пушкой. Изв. Вузов. Радиофизика, 2011, том 54, №8-9, с.690-695.
7. Goldenberg, A.L., Glyavin, M. Yu., .Zavolsky, N. A., Manuilov, V. N. Technological gyrotron with low accelerating voltage // Radiophysics and Quantum Electronics
8. 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.