

Уткина И.Е.³, Лещева К.А.^{1,2}, Мануилов В.Н.^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской академии наук

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

³Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

Методика компьютерного моделирования трехмерных возмущений геометрии и распределения плотности объемного заряда в магнетронно-инжекторных пушках гиротронов

Разработана методика компьютерного моделирования трехмерных возмущений геометрии и распределения плотности объемного заряда в магнетронно-инжекторных пушках гиротронов. Эффективность методики проиллюстрирована на примере расчета магнетронно-инжекторной пушки гиротрона с рабочим магнитным полем 3,37 кГс, ускоряющим напряжением 16 кВ и током пучка 3А.

Ключевые слова: Гиротрон, винтовой электронный пучок, магнетронно-инжекторная пушка.

В гиротронах для формирования активной среды в виде винтового электронного пучка (ВЭП) используют адиабатические аксиально-симметричные магнетронно-инжекторные пушки (МИП). МИП в гиротронах, в отличие от большинства других вакуумных приборов СВЧ, работают в режиме температурного ограничения эмиссии, а не ограничения тока пространственным зарядом пучка. Поэтому, вследствие неоднородности прогрева катода по азимуту, в них наблюдается существенное нарушение азимутальной симметрии распределения плотности тока эмиссии, что приводит к азимутальной неоднородности электронного потока. Это является причиной появления неоднородных полей, которые, в свою очередь, увеличивают скоростной разброс электронов, способствуют возбуждению паразитных низкочастотных колебаний и появлению разброса частиц ВЭП по энергии. Неоднородная структура пучка ответственна также за развитие паразитных мод в резонаторе [1].

Наконец, для улучшения селекции рабочих типов колебаний в гиротронах короткой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонах целесообразно использовать эллиптические или двухзеркальные резонаторы. В таких приборах, для увеличения КПД, целесообразно использовать МИП, где эмиссия идет только с двух секторов катода, разнесенных по азимуту. Очевидно, в таких МИП также будут наблюдаться трехмерные возмущения распределения осцилляторных скоростей в пучке.

Во всех перечисленных случаях необходимо исследование возмущения скоростного распределения, вносимого указанным нарушением аксиальной симметрии. Однако до последнего времени такие исследования ограничивались лишь экспериментальными измерениями азимутального распределения тока эмиссии для ряда гиротронов миллиметрового диапазона длин волн и изучением корреляции этой величины с выходными параметрами гиротрона (мощность, КПД). В частности, в [2] было показано, что нарушение аксиальной симметрии может приводить к значительному снижению КПД

гиротрона и ухудшению устойчивости ВЭП. Теоретический анализ ВЭП до сих пор осуществлялся только в рамках двумерных численных моделей, предполагающих аксиальную симметрию распределения плотности тока [3-4].

Разработка в последнее десятилетие эффективных пакетов прикладных программ трехмерного моделирования, среди которых по праву можно выделить CST Studio Suite [5], позволила поставить в практическую плоскость решение задачи по численному расчету МИП гиротронов в трехмерной постановке. Несмотря на широкие возможности программы CST Studio Suite, расчет влияния нарушения аксиальной симметрии плотности тока ограничен возможностью задания лишь аксиально симметричной эмиссии.

В данной работе представлена методика компьютерного моделирования, позволяющая провести предварительное независимое вычисление и последующее задание (путем импорта файлов данных в CST Studio Suite) начальных координат, скоростей частиц и токов трубок тока при учете несимметрии плотности тока пучка на эмитере. Для создания файлов разработан код, реализованный на языке Python [6]. Программа препроцессинга позволяет задавать тип азимутальной неоднородности (см. рис 1.) и вид функции распределения стартующих с эмиттера МИП электронов, что открывает также возможности учесть при численном анализе такие важные для формирования ВЭП факторы как тепловые скорости электронов и шероховатости эмиттера [4].

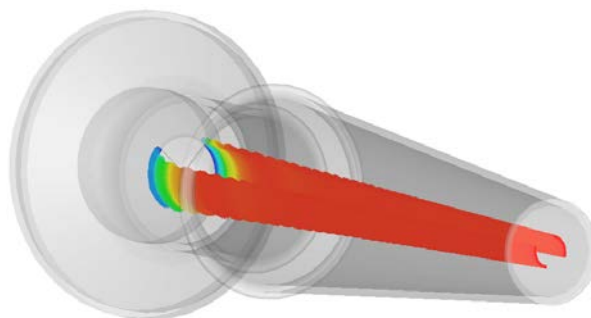


Рис. 1. Пример МИП с неоднородным распределением тока эмиссии.

Специфика механизма генерации СВЧ излучения в гиротроне требует адекватной обработки данных траекторного анализа ВЭП. При этом наиболее важными параметрами являются питч-фактор, скоростной разброс, функция распределения по осцилляторным скоростям, как для пучка в целом, так и для его отдельных азимутальных фракций. Указанные величины не могут быть вычислены на основе стандартного интерфейса обработки данных в среде CST Studio Suite. Поэтому для обработки результатов моделирования был разработан и писан код на языке Python (постпроцессор), который позволяет извлекать из внутреннего представления данных в программе CST Studio Suite результаты траекторного анализа и далее находить все указанные выше параметры ВЭП и представлять их в наглядном графическом виде.

Кратко описаны алгоритмы обработки данных, использованные как при постпроцессинге, так и при вычислении импортируемых в CST Studio Suite данных по начальному положению и скоростям стартующих частиц.

Эффективность методики проиллюстрирована на примере расчета магнетронно-инжекторной пушки гиротрона с рабочим магнитным полем 3,37 кГс, ускоряющим напряжением 16 кВ и током пучка 3А.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00142

Библиографический список

1. Лукша О.И. Винтовые электронные потоки гиротронов: динамика пространственного заряда и методы повышения качества: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук / СПбГПУ. Санкт-Петербург, 2011. 285 с.
2. Louksha O., Pioszyk B., Sominski G. et al. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron // IEEE Trans. Plasma Science. 2006. Vol. 34. N 3. P. 502–511.
3. Hermansfeldt W.B. Electron trajectory program // SLAC Report 226, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 1979. 119 p.
4. 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.
5. CST STUDIO SUITE www.cst.com
6. Python Software Foundation www.python.org