

3D-моделирование паразитных низкочастотных колебаний пространственного заряда в электронно-оптической системе гиротрона

О.И. Лукша, А.Г. Малкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: На основе метода крупных частиц проведено моделирование коллективных процессов в электронном пространственном заряде, захваченном в ловушку между катодом и магнитной пробкой. Определены пороговые условия возбуждения и амплитудно-частотные характеристики низкочастотных колебаний, связанных с развитием неустойчивости в пространственном заряде в ловушке. Обсуждается возможная связь этих колебаний с резонансными структурами, существующими в электронно-оптической системе.

Ключевые слова: СВЧ электроника, гиротрон, винтовой электронный поток, низкочастотные колебания, моделирование.

1. Введение

Гиротроны являются наиболее эффективными устройствами для генерации мощного СВЧ-излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [1]. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность работы гиротрона является качество винтового электронного потока (ВЭП), формируемого в большинстве случаев с помощью магнетронно-инжекторной пушки (МИП). Качественный ВЭП обладает высоким значением среднего питч-фактора $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$, где v_{\perp} и v_{\parallel} – поперечная и продольная компоненты скорости электронов, а также малым энергетическим и скоростным разбросом. При наличии разброса скоростей в винтовом электронном потоке рост среднего питч-фактора в итоге вызывает отражение части потока от магнитной пробки и накопление пространственного заряда в ловушке между катодом и пробкой. Этот накопленный заряд неустойчив, в нем могут возникать паразитные низкочастотные колебания (НЧК), ухудшающие качество первичного потока, поступающего в резонатор. Ранее эти колебания исследовались в рамках одномерного и двумерного моделирования [2 – 5].

В настоящей работе проведено трехмерное численное моделирование динамических процессов в ловушке на базе метода крупных частиц (Particle-In-Cell, PIC) [6] для гиротрона СПБПУ с рабочей частотой 74,2 ГГц и выходной СВЧ-мощностью примерно 100 кВт [7 – 9]. Все расчеты, представленные в данной работе, были выполнены с помощью программы CST Studio Suite [10]

2. Модель электронно-оптической системы и рабочие параметры гиротрона СПБПУ

Расчёты проводились для трёхмерной модели электронно-оптической системы (ЭОС) гиротрона СПБПУ, показанной на рис. 1. На торцевых границах модели ($z = -90$ мм и $z = 274,5$ мм) установлены волноводные порты 6 и 7, обеспечивающие вывод высокочастотных сигналов без отражения. Координата $z = 0$ соответствует центральной плоскости эмитирующего пояса. Напряжение между катодом и анодом задавалось с помощью дискретного линейного порта. Это напряжение плавно увеличивалось от 0 до целевого значения U_0 в течение первых ~50 нс и затем

поддерживалось постоянным. Импеданс порта составлял 50 Ом. Временной шаг интегрирования был выбран равным $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ нс. Общая длительность моделирования составляла 3000 нс, что соответствует примерно 300 – 400 периодам продольных осцилляций одиночной частицы между катодом и магнитной пробкой. К окончанию расчёта общее количество крупных частиц в модели достигало $(1 - 2) \cdot 10^7$. Важно отметить, что в рамках данной работы была учтена вторичная эмиссия электронов с пояaska и с прилегающих к нему областей катодного блока. Ранее было показано, что вторичные электроны играют заметную роль в электронных процессах в ЭОС гиротрона при отражении частиц от магнитной пробки, создавая, в частности, дополнительный канал их поступления в ловушку [4].

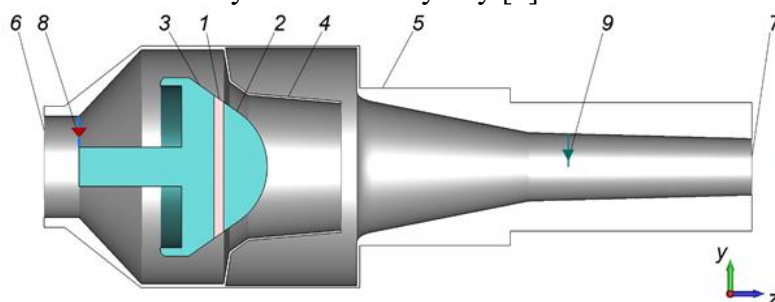


Рисунок 1. Схематическое изображение модели ЭОС гиротрона: 1 – эмитирующий поясок, 2 – передняя часть катода, 3 – задняя часть катода, 4 – анод, 5 – корпус, 6, 7 – волноводные порты, 8 – дискретный порт, 9 – монитор напряжения в плоскости $z = 180$ мм.

Рабочий режим данного гиротрона характеризуется следующими основными параметрами: ток пучка $I_n = 10$ А, магнитное поле в резонаторе $B_0 \approx 2,75$ Тл, коэффициент магнитной компрессии $B_0/B_c = 19,7$, где B_c – магнитное поле на катоде. Ускоряющее напряжение U_0 варьировалось в диапазоне 28 – 36 кВ. При изменении U_0 изменяется коэффициент отражения электронов от магнитной пробки. Начальные значения этого коэффициента R_0 были получены в рамках траекторного анализа при расчете самосогласованных траектории электронов с помощью вычислителя Tracking Solver. Поскольку при отражении электронов от пробки не может быть обеспечено выполнение условия сходимости при расчете самосогласованных траекторий в этом вычислителе, то время моделирование, иначе, число временных шагов при вычислении траекторий, в этих расчетах было выбрано минимальным, при котором, однако, все частицы первичного пучка достигают выходной плоскости $z = 274,5$ мм. В этом случае захваченные в ловушку частицы совершают не более одного отражения в области магнитной пробки. Рассчитанные таким образом значения начального коэффициента отражения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость начального коэффициента отражения R_0 от ускоряющего напряжения U_0 .

U_0 , кВ	R_0 , %
28	0,78
30	1,56
32	4,14
34	8,59
36	14,64

3. ПС-моделирование динамических процессов при отражении электронов от магнитной пробки

В рамках расчета динамических процессов в ловушке были получены зависимости

суммарного заряда частиц во всей области моделирования от времени для разных значений напряжения U_0 , которые приведены на рис. 2. Видно, что после переходного процесса вблизи переднего фронта затем наблюдается плавное возрастание накопленного в ловушке заряда во времени. Наиболее быстрый рост заряда регистрировался, как и ожидалось, при максимальном ускоряющем напряжении $U_0 = 36$ кВ, который характеризуется наибольшим коэффициентом отражения R_0 . Важно отметить, что за все время моделирования не был зафиксирован переход к квазистационарному состоянию, при котором потоки частиц в ловушку и из нее в среднем равны.

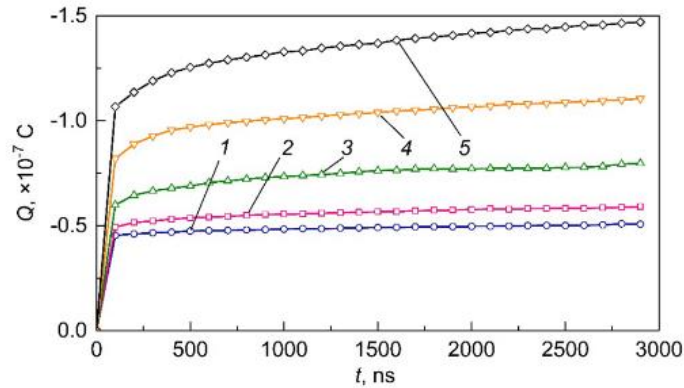


Рисунок 2. Временные зависимости суммарного заряда частиц $Q(t)$ при разных значениях ускоряющего напряжения U_0 : 28 кВ (1), 30 кВ (2), 32 кВ (3), 34 кВ (4), 36 кВ (5).

С течением времени изменяются значения токов, регистрируемых в цепях различных электродов ЭОС. Для $U_0 = 36$ кВ такие зависимости показаны на рис. 3. Здесь видно, что в момент времени $t \approx 50$ нс, когда ток на эмитирующий поясик I_1 максимальный, начинается возрастание тока на заднюю часть катодного блока I_2 и небольшое повышение тока анода I_4 . Снижение I_1 , а также повышение I_2 и I_4 с течением времени обусловлено диффузией захваченных в ловушку электронов в сторону больших радиусов, что наблюдалось и в предыдущих расчетах (например, [4, 5, 11]).

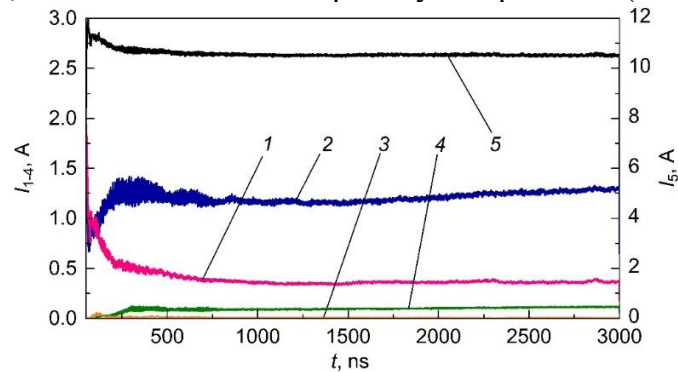


Рисунок 3. Зависимости токов на элементы ЭОС гиротрона от времени при $U_0 = 36$ кВ: 1 – эмитирующий поясик, 2 – задняя часть катодного блока, 3 – передняя часть катодного блока, 4 – анод, 5 – выходная граница $z = 274,5$ мм.

Монитор напряжения, установленный в плоскости поперечного сечения $z = 180$ мм, регистрировал разность потенциалов U_{180} между точкой на оси прибора ($r = 0$) и заземленным корпусом (см. рис. 1). Зависимости $U_{180}(t)$, рассчитанные при разных напряжениях U_0 , показаны на рис. 4. При малых напряжениях $U_0 = 28, 30, 32$ кВ не наблюдалось сигналов, свидетельствующих о развитии регулярных колебаний в накопленном в ловушке пространственном заряде. Такие колебания с частотой $f_{нчк}$, равной примерно 53 МГц, видны на зависимости $U_{180}(t)$ для $U_0 = 36$ кВ. Они

появлялись при $t \approx 1000$ нс и достигали насыщения по амплитуде примерно через 1500 нс, что соответствует ~ 80 периодам колебаний. Если судить по значению $f_{\text{нчк}}$, то можно предположить, что в данном режиме в ловушке осциллирует один электронный сгусток. Это подтверждается сравнением фаз сигналов мониторов напряжения, установленных в плоскостях с различными значениями продольной координаты z .

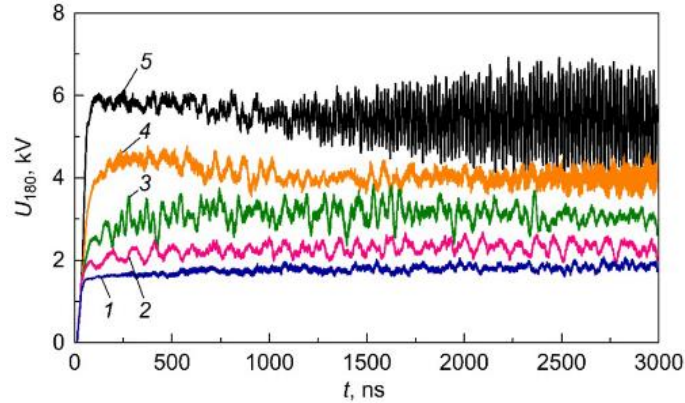


Рисунок 4. Временные зависимости потенциала U_{180} на оси прибора ($r = 0$) в плоскости поперечного сечения $z = 180$ мм при разных значениях ускоряющего напряжения U_0 : 28 кВ (1), 30 кВ (2), 32 кВ (3), 34 кВ (4), 36 кВ (5).

При меньшем напряжении $U_0 = 34$ кВ и, соответственно, меньшем потоке частиц в ловушку по сравнению с $U_0 = 36$ кВ в конце времени моделирования наблюдались небольшие по амплитуде сигналы на частоте примерно 150 МГц (см. рис. 4). Такое значение частоты указывает на возможное существование одновременно трех осциллирующих сгустков в ловушке. Кратное увеличение частоты НЧК при снижении коэффициента отражения от пробки наблюдалось ранее при одномерном моделировании [3, 9]. В целом, при переходе от одномерного к трехмерному моделированию заметно увеличились пороговые значения коэффициента отражения от магнитной пробки и накопленного в ловушке пространственного заряда, при которых появлялись регулярные НЧК. Причина такого различия, возможно, связана с относительно малым числом крупных частиц, на которые разбивается электронный поток, при трехмерном моделировании. Увеличение этого числа, к сожалению, ограничено ресурсами вычислительной системы.

Представляется возможной связь НЧК в электронном облаке с двумя типами резонансных структур в ЭОС гиротрона: объемным резонатором, которым может быть некоторая полость в приборе, и эквивалентным колебательным контуром (распределенной LC-цепью). Расчеты собственных мод в данной модели ЭОС с помощью вычислителя Eigenmode Solver показали, что значения резонансных частот всех мод превышают 1 ГГц, т.е. заметно больше $f_{\text{нчк}}$. Не была отмечена "привязка" частоты сигналов в электронном пространственном заряде к частотам этих мод. Распределенная LC-цепь образовывалась с помощью индуктивности дискретного порта и емкости межэлектродного зазора катод-анод. В данной модели ее резонансная частота лежала в диапазоне сотен мегагерц. Эту частоту, а также добротность LC-контра, можно было изменять за счет изменения геометрии элементов ЭОС, размеров дискретного порта, или при установке поглотителя. Если специально не задавать импеданс дискретного порта, то в сигналах токов на электроды ЭОС присутствовали высокочастотные составляющие на резонансной частоте LC-контра. Амплитуда этих составляющих возрастала с увеличением накопленного в ловушке пространственного заряда при повышении U_0 . Однако введением в дискретном порту импеданса, равного 50 Ом, было достигнуто подавление сигналов, связанных с возбуждением LC-контра. В реальном приборе также могут существовать подобные LC-цепи, связанные с

электронным потоком. При наличии такой связи возможна "привязка" частоты НЧК к резонансной частоте этой цепи (см., например, [12]). Снижение добротности LC-контра в этом случае может позволить уменьшить интенсивность паразитных НЧК в приборе.

4. Заключение

В данной работе было впервые проведено трехмерное PIC-моделирование процессов накопления и динамики электронного пространственного заряда в ловушке между катодом и магнитной пробкой. Показана возможность возникновения паразитных низкочастотных колебаний, обусловленных группировкой заряда в осциллирующие в продольном направлении сгустки. Специальное внимание в расчетах уделено связи характеристик паразитных колебаний с параметрами резонансных структур, существующих в ЭОС гиротрона. Выявлено влияние на динамические процессы в электронном потоке LC-контра, образованного электродами пушки и источником напряжения. Устранить влияние этого контра позволило снижение его добротности при введении дополнительного сопротивления.

Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<http://www.scc.spbstu.ru>).

Авторы благодарны П.А. Трофимову за помощь при обсуждении полученных результатов.

Список литературы

1. Thumm M. K. A. et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // *Nuclear Fusion*. – 2019. – Т. 59. – №. 7. – С. 073001.
2. Борзенков Д. В., Лукша О. И. Численное моделирование динамики пространственного заряда в ловушке гиротрона // *Журнал технической физики*. – 1997. – Т. 67. – №. 9. – С. 98-101.
3. Luksha O. I. Simulation of low-frequency collective processes in gyrotron electron beams // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2009. – Т. 52. – №. 5. – С. 386.
4. Кривошеев П. В., Мануилов В. Н. Учет вторичных электронов при численном моделировании интенсивных винтовых пучков гиротронов // *Прикладная физика*. – 2002. – №. 3. – С. 80-87.
5. Manuilov V. N. Numerical simulation of low-frequency oscillations of the space charge and potential in the electron-optical system of a gyrotron // *Radiophysics and quantum electronics*. – 2006. – Т. 49. – №. 10. – С. 786-792.
6. C.K. Birdsall., A.B. Langdon. *Plasma Physics via Computer Simulation*. – McGraw-Hill, 1985.
7. Louksha O. I. et al. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron // *IEEE transactions on plasma science*. – 2006. – Т. 34. – №. 3. – С. 502-511.
8. Louksha O. I. et al. Dynamic processes in helical electron beams in gyrotrons // *Technical Physics*. – 2013. – Т. 58. – №. 5. – С. 751-759.
9. О.И. Лукша. Винтовые электронные потоки гиротронов: динамика пространственного заряда и методы повышения качества: дисс. д-ра физ.-мат.наук: 01.04.04 / СПбПУ, Санкт-Петербург, 2011.
10. CST Studio Suite. Electromagnetic field simulation software. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
11. Мануилов В. Н., Мазур А. А. Подавление колебаний пространственного заряда в мип гиротронов с неэквипотенциальным катодом // *Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского*. – 2011. – №. 5-3. – С. 327-338.
12. Piosczyk B. et al. Coaxial cavity gyrotron-recent experimental results // *IEEE transactions on plasma science*. – 2003. – Т. 30. – №. 3. – С. 819-827.