

УДК 621.385.69

Магнитно-экранированная электронно-оптическая система гиротрона в режиме ограничения тока пространственным зарядом

А. Н. Куфтин, С. П. Белов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты численного траекторного анализа неадиабатической электронно-оптической системы (ЭОС) гиротрона в режиме ограничения тока пространственным зарядом (ρ -режиме). Формирование винтового электронного пучка осуществляется при прохождении прямолинейно движущихся частиц через область сильно неоднородного магнитного поля соленоидов, снабженных ферромагнитными экранами. Результаты расчетов позволили найти оптимальные параметры ЭОС в ρ -режиме и исследовать скоростное распределение в формируемом винтовом пучке.

Диапазон миллиметровых и субмиллиметровых волн представляет значительный интерес для физических исследований и технических приложений. В данном диапазоне длин волн наиболее эффективными генераторами когерентного электромагнитного излучения являются гиротроны, превосходящие аналогичные приборы других типов по средней мощности на два-три порядка [1]. В гиротронах используются пучки электронов, движущихся по винтовым траекториям в статическом однородном магнитном поле B с циклотронной частотой $\omega_c = \frac{e}{m} B = \eta B$ (e — заряд, m — релятивистская масса электрона).

Специфика гиротронов (слаборелятивистских мазеров на циклотронном резонансе), у которых энергия излучения черпается из энергии осцилляторного движения электронов, приводит к необходимости формирования интенсивных винтовых электронных потоков (ВЭП) с приемлемыми параметрами скоростного распределения — большим питч-фактором $g = V_{\perp} V_{\parallel} > 1$ (V_{\parallel} и V_{\perp} , соответственно, средние поступательная, параллельная силовой линии магнитного поля и осцилляторная компоненты скорости) и малым относительным разбросом $\delta V_{\parallel} = \Delta V_{\parallel} / V_{\parallel}$. Эти требования, в общем, противоречивы, поэтому задача оптимизации электронно-оптических систем (ЭОС) гиротронов весьма сложна [2]. Полная скорость электронов в рабочем пространстве $V_0 = \sqrt{V^2 + V_{\perp}^2} = \sqrt{2\eta U_0} = \text{const}$, относительные разбросы скоростей поступательного и вращательного движения связаны соотношением $\delta V_{\parallel} \approx g^2 \delta V_{\perp}$. Наличие скоростного разброса приводит к разбросу времен жизни осцилляторов в рабочем пространстве, возрастающему с ростом g (с соответствующим падением эффективности взаимодействия), и потере устойчивости электронных потоков. Большие характерные размеры ЭОС гирорезонансных приборов облегчают реализацию сильноточных ВЭП. Однако в них существенна роль поля пространственного заряда пучка, приводящего, как правило, к росту скоростного разброса. Особенно сильное возмущение в скоростное распределение вносят эффекты, вызванные в основном захватом части электронов в магнитную ловушку [2]. Эти возмущения при достижении

пороговых значений тока приводят к неустойчивостям электронного потока, которые в конечном счете срывают работу гирорезонансных мазеров в режимах с большой средней мощностью или большой энергией в импульсе.

В настоящей работе теоретически исследуется неадиабатическая электронно-оптическая система гиротрона в режиме ограничения тока пространственным зарядом (ρ -режиме), в которой формирование винтовых электронных пучков осуществляется при прохождении прямолинейной движущихся частиц через область сильно неоднородного магнитного поля соленоидов, снабженных ферромагнитными экранами [3]. Указанная система имеет принципиальные отличия от традиционных адиабатических магнетронно-инжекторных пушек [4] гирорезонансных приборов и открывает интересные возможности для этого класса СВЧ электронных приборов. Исследование магнитно-экранированных ЭОС в ρ -режиме представляет практический интерес при создании для целого ряда физических и технических приложений мощных гирорезонансных генераторов и усилителей, устойчиво работающих в непрерывном или квазинепрерывном режиме.

Магнитно-экранированная ЭОС

Обобщенная модель магнитно-экранированной ЭОС представлена на рис. 1. В пушке сначала формируется прямолинейный ламинарный пучок. Важным свойством системы является возможность работать в режиме ограничения тока пространственным зарядом (ρ -режим), что должно способствовать повышению устойчивости пучков (уменьшается вероятность неуправляемого нарастания эмиссионного тока) и улучшению эксплуатационных характеристик гирорезонансных мазеров. Из-за равенства нулю напряженности электрического поля на эмиттере, в ρ -режимных пушках снижается вероятность пробоев, что способствует повышению надежности и долговечности как эмиттера, так и гиротрона в целом. Фактор эмиссии из области полного пространственного заряда также сглаживает влияние шероховатостей эмитирующей поверхности, неоднородного нагрева и неравномерности эмиссии с различных участков катода на параметры формируемого пучка. Наконец, упрощается эксплуатация прибора, так как отпадает необходимость регулирования нагрева катода для обеспечения нужного тока пучка.

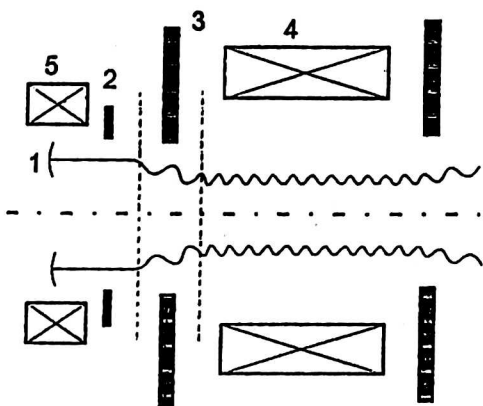


Рис. 1. Схема магнитно-экранированной ЭОС:

- 1 — катод; 2 — анод; 3 — ферромагнитный экран; 4 — основной соленоид;
- 5 — корректирующая катодная катушка

Первичная закрутка электронов осуществляется неоднородным магнитным полем в области ферромагнитных экранов (см. рис. 1). При дальнейшем движении в плавно нарастающем магнитном поле осцилляторные скорости частиц увеличиваются, как и в традиционных адиабатических системах, в соответствии с условием сохранения поперечного адиабатического инварианта. Отсутствие скрещенных полей в прикатодной области способствует повышению устойчивости пучка. С другой стороны, наличие сильно неоднородного магнитного поля препятствует накоплению отраженных электронов в магнитной ловушке между катодом и рабочим пространством, что также снижает вероятность возникновения неустойчивостей в электронном пучке. В режиме непрерывной генерации это особенно важно. Дополнительным достоинством магнитно-экранированных ЭОС является увеличение при прочих равных условиях длины рабочего пространства взаимодействия гирорезисторного прибора (однородного участка магнитного поля) или снижение мощности питания соленоида при той же длине (из-за экранировки магнитное поле локализуется в области между ферромагнитными экранами). Исследование указанных систем можно рассматривать как этап при переходе к системам формирования на постоянных магнитах [5].

Траекторный анализ магнитно-экранированной ЭОС в ρ -режиме

На основе соленоида с ферромагнитными экранами была разработана конструкция магнитно-экранированной ЭОС малогабаритного гиротрона, работающего в непрерывном режиме на второй гармонике циклотронной частоты ($n = 2$) с выходной мощностью $P_{\text{вых}} = 5-20$ кВт и длиной волны $\lambda = 8,5$ мм. Магнитная индукция в области взаимодействия $B_0 = 0,67$ Тл на длине однородного участка $L_0 = 85$ мм (по уровню $\delta B_0 \leq 0,5$ %) в отверстии с проходным диаметром 30 мм, мощность питания соленоида $P_{\text{сол}} = 5$ кВт.

Численное моделирование ВЭП проводилось при следующих предположениях:

- статическая модель;
- аксиальная симметрия;
- нулевые начальные скорости;
- режим ограничения тока пространственным зарядом;
- отсутствие отраженных от магнитной пробки электронов.

Траекторный анализ с учетом поля пространственного заряда выполняется по программе ЭПОСР, базирующейся на введении вспомогательных зарядов и сеток [6, 7]. Магнитное поле соленоидов с ферромагнитными экранами (с учетом реальных характеристик ферромагнетиков) рассчитывалось по программе ВЕБЕР [8], которая была предварительно согласована с программой анализа. Основные исходные величины для отыскания конфигурации пушки, работающей в двухпотенциальном режиме и формирующей ВЭП с требуемыми параметрами, были следующими:

- ускоряющее напряжение $U_0 = 20-30$ кВ;
- длина волны СВЧ-колебаний $\lambda = 0,8$ мм ($n = 2$); $B_0 = 0,67$ Тл;
- ток пучка $I \leq 2$ А;
- средний радиус катода $R_k = 8,5$ мм;
- радиус пучка в резонаторе $R_0 = 2,52$ мм;
- потенциал анода $U_a \leq 30$ кВ.

На рис. 2 показаны конфигурация электродов и траектории электронов для магнитно-экранированной ЭОС малогабаритного гиротрона в ρ -режиме.

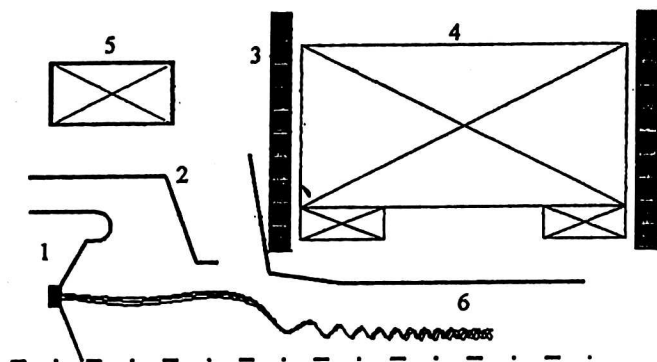


Рис. 2. Конфигурация электродов и траектории электронов:

- 1 — катод; 2 — анод;
- 3 — ферромагнитный экран;
- 4 — основной соленоид;
- 5 — корректирующая катушка; 6 — резонатор

Фокусирующие катодные электроды образуют угол 67,5 град с нормалью к поверхности эмиттера. Пушка первоначально формирует прямолинейный трубчатый ламинарный пучок, который следует вдоль силовых линий магнитного поля в область постоянного поля (резонатора) — магнитно-ограниченный пучок пушки Пирса [9—11].

Первичная закрутка электронов осуществляется неоднородным магнитным полем в области ферромагнитных экранов (см. рис. 2). При дальнейшем движении в плавно нарастающем магнитном поле осцилляторные скорости частиц увеличиваются, как и в традиционных адиабатических системах, в соответствии с условием сохранения поперечного адиабатического инварианта.

Результаты траекторного анализа для одного из вариантов магнитно-экранированной ЭОС малогабаритного гиротрона в ρ -режиме приведены в табл. 1 ($U_0 = 20$ кВ; $I < 1$ А; $U_a \leq 20$ кВ; $P_{\text{вых}} \leq 5$ кВт).

Таблица 1

U_a , кВ	$I_{\text{кат}}$, А	I , А	δI , %	g	δV_L , %	T_E
20	2,5	0,662	0,01	1,78	12,4	0,154
17,5	2,5	0,521	0,011	1,67	13,5	0,187
15	2,25	0,414	0,013	1,69	14,1	0,203
12,5	2	0,316	0,012	1,72	14,3	0,207
10	1,5	0,231	0,015	1,67	14,6	0,222
7,5	1	0,154	0,015	1,83	14,7	0,251
5	1	0,088	0,017	1,94	13,4	0,303

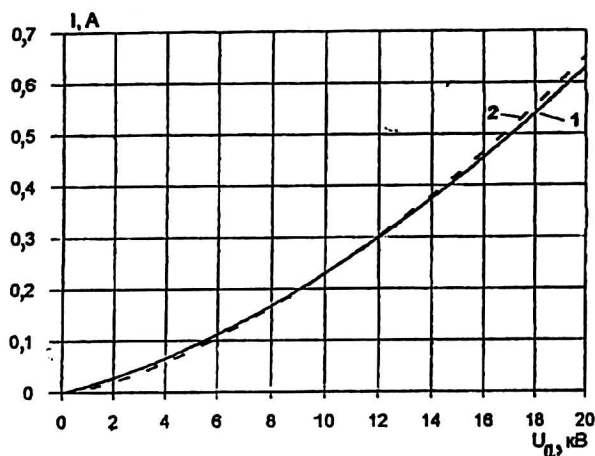
Процесс счета прерывался на 20-й итерации, так как дальнейшее увеличение числа итераций незначительно увеличивает точность расчета. В последней колонке $T_E = E/E_0$ — усредненный по всем точкам вылета коэффициент экранировки электрического поля на эмиттере; E_0 — поле при нулевом токе пучка.

Величина T_E характеризует точность счета, величина δI — относительная ошибка расчета тока [6, 7]. При уменьшении напряжения анода происходит уменьшение питч-фактора g (влияние анодной линзы). Для поддержания его на заданном уровне ($g \sim 1,7$) необходимо уменьшать магнитное поле дополнительной корректирующей катодной катушки ($\beta = 0,01$ Тл/А; $P_{\text{кат}} = 44$ Вт при $I_{\text{кат}} = 2,5$ А), тем самым немного увеличивая степень неоднородности магнитного поля. Величина относительно осцилляторного скоростного разброса

δV_1 не превышает 15 %. Вольт-амперные характеристики пушки приведены на рис. 3 ($I = PU_a^{3/2}$, где первеанс системы $P = 0,23 \text{ мкА/В}^{3/2}$ находился в результате усреднения расчетных данных). Небольшое несовпадение кривых связано, по-видимому, с наличием магнитного поля на катоде (магнитное сопровождение) и влиянием провисания потенциала пучка, не садящегося на анод.

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики пушки:

- 1 — получена расчетным путем;
2 — отражает закон “трех вторых”,
 $I = PU_a^{3/2}$



Для более мощного варианта гиротрона оптимальные параметры магнитно-экранированной ЭОС в р-режиме приведены в табл. 2 ($U_0 = 30 \text{ кВ}$; $I \leq 2 \text{ А}$; $U_a \leq 30 \text{ кВ}$; $P_{\text{вых}} \leq 20 \text{ кВт}$). Последняя отличается от описанной выше ЭОС малогабаритного гиротрона только небольшим изменением конфигурации анода (см. 2 на рис. 2) и увеличением питающих напряжений. Первеанс системы $P = 0,39 \text{ мкА/В}^{3/2}$.

Таблица 2

U_a , кВ	$I_{\text{кат}}$, А	I , А	g	δV_1 , %
30	2,5	1,993	1,55	11,8
25	2,25	1,502	1,55	12,5
20	2,0	1,094	1,57	13,8
15	1,75	0,721	1,62	14,6
10	1,5	0,317	1,71	15,0

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о возможности создания магнитно-экранированной ЭОС в р-режиме, формирующей винтовые пучки с приемлемыми значениями пич-фактора, скоростного разброса и тока пучка. Результаты анализа указывают на возможность повышения устойчивости пучков по сравнению с традиционными адиабатическими ЭОС. Расчетные параметры ВЭП оптимизированных систем приемлемы для практических вариантов ЭОС гирорезонансных приборов.

Результаты работы носят предварительный характер, однако они подтверждают перспективность использования рассмотренной ЭОС. Необходимы и планируются в ближайшее время дальнейшие численные и экспериментальные исследования по оптимизации магнитно-экранированной ЭОС в р-режиме. Все это позволит в полной мере реализовать потенциальные преимущества магнитно-экранированной электронно-оптической системы в режиме ограничения тока пространственным зарядом в гиротронах средней мощности.

Л и т е р а т у р а

1. *Garopov-Grekhov A. V., Granatstein V. L.* Applications of High Power Microwaves. — Artech House, Boston, London, 1994.
2. *Запезалов В. Е., Лыгин В. К., Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е.* Электронно-оптические системы мощных МЦР//В сб.: Гиротроны. — Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 5—32.
3. *Куфтин А. Н.* Неадиабатическая электронно-оптическая система гирорезонансных приборов: Тез. докл. 11 конф. "Методы расчета ЭОС". — Алма-Ата, 1992. С. 93.
4. *Гольденберг А. Л., Петелин М. И.* Формирование винтовых электронных пучков в адиабатической пушке//Изв. вузов.. Сер. Радиофизика, 1973. Т. 16. № 1. С. 141—149.
5. *Куфтин А. Н., Мануилов В. Н., Райский Б. В., Флягин В. А., Цимринг Ш. Е.* Гиротроны с постоянными магнитами//Там же. 1992. Т. 35. № 6—7. С. 614—618.
6. *Лыгин В. К., Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е.* О методах интегральных уравнений и вспомогательных зарядов в траекторном анализе интенсивных электронных пучков//Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1987. Вып. 7(401). С. 36—38.
7. *Райский Б. В., Цимринг Ш. Е.* О расчете систем формирования интенсивных электронных пучков в режиме ограничения тока пространственным зарядом//Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1993. Т. 38. № 6. С. 981—985.
8. *Блохин А. А., Кошаев Б. Г., Молоковский С. И.* Численный расчет магнитных фокусирующих систем с учетом реальных характеристик ферромагнетиков//В сб.: Методы расчета ЭОС. — М.: Наука, 1977. С. 155—159.
9. *Пирс Дж. Р.* Теория и расчет электронных пучков. — М.: Сов. радио, 1956.
10. *Зинченко Н. С.* Курс лекций по электронной оптике. — Харьков: ХГУ, 1961.
11. *Кириштейн П. Т., Кайно Г. С., Уотерс У. Е.* Формирование электронных пучков. — М.: Мир, 1970.

Авторы глубоко признательны В. Е. Запезалову и В. Н. Мануилову за неоднократное обсуждение данной работы и ценные советы. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 99-02-17779.

Magnetic shielded electron optical system of a gyrotron in space charge limited current regime

A. N. Kuftin, S. P. Belov

Institute of Applied Physics RAS, N. Novgorod, Russia

The results of numerical simulation of a gyrotron nonadiabatic electron optical system (EOS) in space charge limited current regime (ρ -regime) are presented. Formation of helical electron beams is carried out at rectilinearly moving particles through area of strong nonuniform magnetic field of solenoids supplied with ferromagnetic screens. The results of calculations have allowed to find optimum parameters EOS in ρ -regime and to explore velocity distribution in electron beams.