

О. П. Планкин, Е. С. СемёновИнститут прикладной физики РАН
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия

E-mail: plankin@appl.sci-nnov.ru; semes@appl.sci-nnov.ru

**ТРАЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГИРОТРОНА***

Приведены результаты численного моделирования системы формирования винтового электронного пучка для технологического гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц. Представлен новый комплекс программ ANGEL-2DS, предназначенный для расчета параметров винтовых электронных пучков гироприборов. Кратко изложены используемые в коде математические методы. Выполнен траекторный анализ гиротрона, предназначенного для микроволновой обработки материалов. Показана возможность формирования однородных винтовых электронных пучков с большой долей вращательной энергии. Проведено сравнение расчетных данных, полученных различными программными средствами, с экспериментальными данными. Продемонстрировано соответствие результатов расчетов оценкам параметров электронного потока, сделанным на основании измерения КПД.

Ключевые слова: гиротрон, электронная оптика, численное моделирование.

Введение

Последние десятилетия характеризуются широким использованием электровакуумных источников когерентного электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн в различных областях физики и техники [1–3]. По уровню выходной мощности в этом диапазоне несомненное лидерство принадлежит гирорезонансным генераторам (гиротроны, гиро-ЛОВ) и усилителям (гироклистроны, гиро-ЛБВ), основанным на взаимодействии винтового потока электронов с высокочастотными полями электродинамических систем, не содержащих малых по сравнению с длиной волны элементов (см., например, обзоры [4; 5]). Последнее обстоятельство позволяет избежать миниатюризации пространства взаимодействия и относительно просто реализовать системы с большой запасенной энергией активной среды (элек-

тронный пучок) и приемлемыми тепловыми нагрузками на элементы прибора. Несмотря на значительные успехи в развитии гиротронов, достигнутые за время исследований, проблемы повышения мощности и КПД гиротронов, равно как и освоение гиротронами субмиллиметрового диапазона длин волн продолжают оставаться актуальными [6].

В гироприборах используются интенсивные трубчатые пучки электронов, движущихся по винтовым траекториям. Они формируются, как правило, магнетронно-инжекторными пушками (МИП) [7]. КПД гироприборов в значительной мере определяется средним питч-фактором $g = v_{\perp}/v_{\parallel}$, который определяет долю энергии электронов, преобразованной в энергию вращения, а также разбросом поступательных v_{\parallel} и вращательных v_{\perp} компонент скорости электронов. Из условия устойчивости электронного пучка в магнитном поле пробочной

* Авторы глубоко признательны М. Ю. Глявину и В. Е. Запелову за плодотворные дискуссии и внимание к работе.

конфигурации следует, что чем меньше разброс компонент скорости, тем больше максимальный пичч-фактор [8]. Поэтому повышение качества электронного пучка – снижение скоростного разброса – продолжает быть важным резервом повышения КПД гиротронов, в особенности потому, что разброс имеет тенденцию роста с увеличением мощности и частоты прибора.

Для расчета параметров электронного пучка разработчиками гиротронов используется большое количество вычислительных кодов – как коммерческих, разработанных для широкого круга задач (CST Studio, HFSS), так и специализированных (SLAC EGUN [9], EPOS-V [10]). Главным недостатком коммерческих кодов является их высокая цена и необходимость значительных вычислительных ресурсов. В данной статье приводятся результаты исследования электронно-оптической системы (ЭОС) технологического гиротрона, полученные комплексом программ ANGEL-2DS (ANalyser of a Gyrating Electrons). Этот комплекс создан авторами статьи, опираясь на опыт имевшихся в ИПФ РАН [11; 12] и ННГУ [13–15] наработок, и обладает рядом отличий по сравнению с ранее созданными кодами. Основными достоинствами кода можно считать соответствие современным программно-аппаратным средствам и удобный пользовательский интерфейс ввода-вывода данных и обработки результатов, что делает его доступным широкому кругу пользователей [16].

Основные особенности программного кода ANGEL-2DS

Комплекс программ ANGEL-2DS (далее – Программа) предназначен для численного моделирования ЭОС, в том числе магнетронно-инжекторных пушек гироприборов. Программа позволяет рассчитывать траектории электронов в случае азимутально-симметричной магнитной системы и системы электродов (2D) в режиме температурного ограничения эмиссии. Расчет может производиться как без учета, так и с учетом статического (S) пространственного заряда пучка. Для увеличения скорости расчетов в программе предусмотрено распараллеливание вычислений на многопроцессорных (многоядерных) компьютерах с общей памятью, но не на кластерах. Программа работает в среде MS Windows и использует ее стандартные инструменты графического интерфейса пользователя (GUI – Graphical User Interface).

Интерфейс Программы состоит из стандартного окна приложения, содержащего главное меню, панель инструментов, статусную строку и пять вкладок (рис. 1). На вкладках можно определять используемые единицы измерения, параметры эмиссии и численные параметры расчета, задавать геометрический профиль, потенциалы и другие свойства электродов, а также магнитную систему, оперативно наблюдать результаты траекторного анализа, используя вывод графической информации, такой как

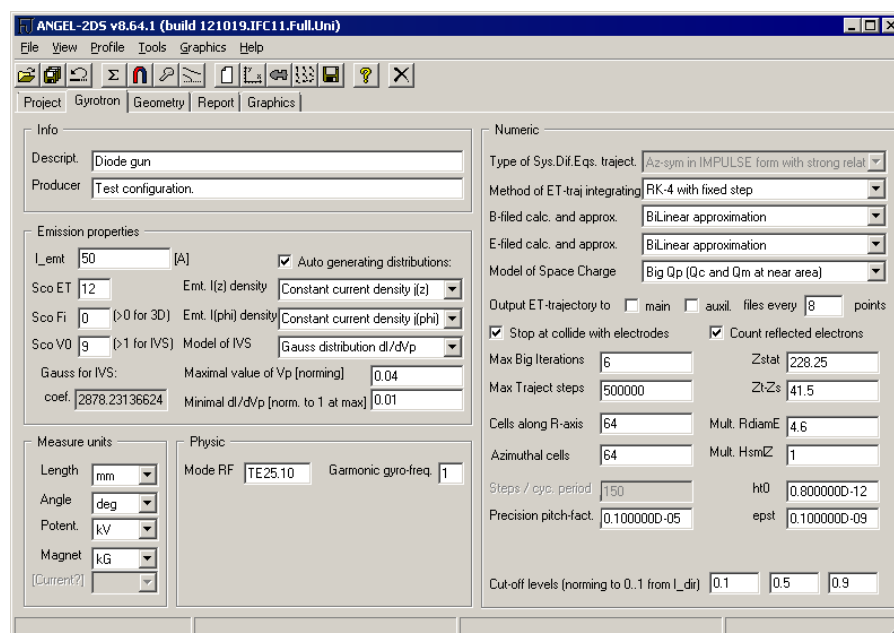


Рис. 1. Основное окно Программы, открыта вкладка *Gyrottron*

эскиз пушки, отображение траекторий электронов и векторных полей, гистограммы некоторых распределений и т. п.

Численное моделирование винтовых электронных пучков в Программе проводится приближенным решением уравнения Пуассона и уравнения непрерывности, которые в аксиально-симметричной системе имеют следующий вид [8]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\nabla U, \\ \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} &= -\rho, \\ U|_r &= U_B, \quad \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \end{aligned}$$

а также системы уравнений движения электронов в найденных полях:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\gamma \mathbf{v})}{\partial t} &= \eta(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \\ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} &= \mathbf{v}, \quad \mathbf{r}|_{t=0} = \mathbf{r}_0, \quad \mathbf{v}|_{t=0} = \mathbf{v}_0, \end{aligned}$$

где \mathbf{v} – скорость электрона; $\eta = e_0/m_0 \approx -1,759 \cdot 10^{11}$ [Кл/кг] – удельный заряд электрона; $\gamma = m/m_0$ – релятивистский фактор; \mathbf{E} и \mathbf{B} – напряженность электрического поля и индукция магнитного поля соответственно; ρ и $\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}$ – плотности пространственного заряда и тока электронного пучка, потенциал U_B на границе соответствует потенциалу электродов ЭОС.

Нахождение плотности объемного заряда потока электронов производится с помощью метода трубок тока, традиционно используемого для решения статических задач [17], а решение системы самосогласованных уравнений – методом последовательных итераций. На начальной (нулевой) итерации плотность объемного заряда полагается равной нулю, и находится решение уравнения Лапласа при заданных граничных условиях (известны распределение потенциала U_B вдоль границ области и плотность тока на эмиттере). Далее поток частиц, вылетающих с эмиттера, разбивается на N трубок тока (каждая из них несет сохраняющийся при движении ток I_k , $k = 1..N$). Пространственный заряд, вносимый k -й трубкой в одну ячейку сетки, равен $Q_{m,k} = I_k \Delta t$, где Δt – время нахождения частицы в пределах ячейки; полный заряд ячейки Q_m получается суммированием зарядов $Q_{m,k}$ по всем трубкам тока, прошедшим через данную ячейку. Интегрирование уравнений движения в найденных электрическом (\mathbf{E}) и магнитном (\mathbf{B}) полях

позволяет определить траектории каждой токовой трубки и распределение плотности пространственного заряда. На следующих итерациях электрическое поле находится из решения уравнения Пуассона с плотностью ρ , вычисленной на предыдущей итерации, и затем вновь рассчитываются электронные траектории.

Кроме электронов с нулевыми начальными скоростями \mathbf{v}_0 , можно задавать начальный скоростной разброс, зависящий от шероховатостей поверхности катода, теплового разброса скоростей и ряда других факторов [13]. Как правило, начальный разброс задается исходя из эмпирических данных, полученных в процессе тестирования изготовленных МИП, и результаты расчетов свидетельствуют о том, что начальный скоростной разброс, может существенно влиять на итоговый скоростной разброс в рабочем пространстве прибора. В нашей модели азимутальная компонента начальной скорости v_ϕ изменяется в диапазоне $[-V_{\max}, V_{\max}]$, где V_{\max} – максимальная начальная скорость, нормированная на полную скорость

$$v_a = \sqrt{2\eta U_0},$$

U_0 – разность потенциалов на катоде и резонаторе. Компоненты начальной скорости $v_z = v_r = 0$, так как в работе [10] показано, что вклад этих компонент мал по сравнению с v_ϕ . Ток каждой подтрубки определяется гауссовым распределением $f(v_\phi)$, в котором $f(0) = 1$.

Магнитное поле задается системой соленоидов, и его индукция \mathbf{B} не зависит от величины пространственного заряда. Магнитная индукция аксиально-симметричного соленоида ($a_1 \leq r \leq a_2$) с прямоугольным продольным сечением ($g_1 \leq z \leq g_2$) определяется соотношениями [18]

$$\mathbf{B} = (B_r, 0, B_z),$$

$$B_r(r, z) = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z},$$

$$B_z(r, z) = \frac{\partial A_\phi}{\partial r} + \frac{A_\phi}{r},$$

$$A_\phi = \int_0^\pi d\phi \int_{a_1}^{a_2} d\tilde{r} \int_{g_1}^{g_2} d\tilde{z} W(r, z, \tilde{r}, \tilde{z}, \phi),$$

$$W = \frac{\tilde{r} \cos \phi}{\sqrt{R}},$$

где $R(r, z, \tilde{r}, \tilde{z}, \phi) = (\tilde{z} - z)^2 + \tilde{r}^2 + r^2 - 2r\tilde{r} \cos \phi$. Для нахождения поля в любой точке пространства достаточно провести численное

интегрирование по угловой координате, вычислив интегралы по r и z аналитически [19], что значительно увеличивает скорость и точность расчета.

Расчет электрического поля проводится методом дискретных источников (МДИ) [20–22], применение которого здесь эффективно по причине малого заполнения пучком межэлектродного пространства. Суть МДИ заключается в представлении поля в виде линейной комбинации полей дискретных источников Q_i , расположенных вдоль электродов в точках (ρ_i, ζ_i) , отстоящих от поверхности электродов «вглубь» металла на расстояние порядка шага:

$$E = -\nabla U,$$

$$U(r, z) = \sum_{i=1}^N Q_i G(r, z, \rho_i, \zeta_i) + U_S(r, z),$$

$$G(r, z, \rho_i, \zeta_i) = C_0 F(k) \chi^{-1/2},$$

$$C_0 = \frac{1}{2\pi^2 \epsilon_0}, \quad k^2 = \frac{4r\rho_i}{\chi},$$

$$\chi = (r + \rho_i)^2 + (z - \zeta_i)^2,$$

$$F(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta}}.$$

Здесь $U_S(r, z)$ – потенциал, порожденный пространственным зарядом пучка на предыдущей итерации. На нулевой итерации полагается $U_S = 0$, а на последующих он находится по МДИ

$$U_S(r, z) = \sum_{m=1}^M Q_m G(r, z, \rho_m, \zeta_m)$$

с той же функцией Грина G , что и при нахождении потенциала на границе; M – общее количество ячеек сетки для учета пространственного заряда электронного пучка.

Заряды Q_i находятся из системы линейных алгебраических уравнений, полученной проверкой граничного условия (равенство потенциала заданному U_B) в дискретных точках (точках коллокации), расположенных с некоторым шагом на поверхности электродов:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N Q_i G(r_j, z_j, \rho_i, \zeta_i) = U_B(r_j, z_j) - U_S(r_j, z_j), \\ j = 1, \dots, N. \end{cases}$$

Для ускорения вычислений производится параболическая интерполяция эллиптических интегралов по заранее заготовленной таблице их значений, вычисленных с некоторым фиксированным шагом.

Поскольку размеры пучка электронов по оси r меньше изменения среднего радиуса при движении от катода к резонатору, сетка сделана «гибкой»: она максимально облегает пучок, что позволяет значительно экономить память и время расчета. Следуя [21], для оптимизации времени счета реализована работа с сеткой «укрупненных зарядов». Для интегрирования уравнений движения используются методы Рунге – Кутты 4-го порядка (обычный и с модификацией Мерсона, позволяющей вести контроль точности на каждом шаге) и Адамса – Башфорта.

Геометрия (*профиль*) электродов гиротрона формируется из нумерованных сегментов, каждый из которых пользователь индивидуально определяет, задавая параметры и настройки. Сегмент представляет собой (в плоскости (r, z)) отрезок прямой. Составляющие один электрод сегменты могут иметь скругления на стыках. Помимо ручного задания координат концов сегмента, пользователь может установить *связи* между текущим и соседними (предыдущим и последующим) сегментами индивидуально для каждой координаты.

Траекторный анализ ЭОС гиротрона, предназначенного для микроволновой обработки материалов

Электронная пушка, основные параметры которой сведены в табл. 1, схематично изображена на рис. 2. Она состоит из трех электродов: катод и два анода с напряжениями U_0 на основном (связанном с резонатором) и U_a на дополнительном (ближайшем к катоду). Данная ЭОС предназначена для непрерывного 10 кВт технологического гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц (2 гармоника), рабочей модой TE_{02} , подробно описанного в [23].

Магнитная система состоит из основного соленоида с корректирующими катушками, создающими однородное поле в области пространства взаимодействия и дополнительного соленоида, расположенного вблизи катода и предназначенного для корректировки параметров электронного потока в процессе настройки режима генерации.

Результаты численного моделирования электронных траекторий в области формирования для исследуемой ЭОС получены с использованием программных кодов ANGEL-2DS и EPOS-V.

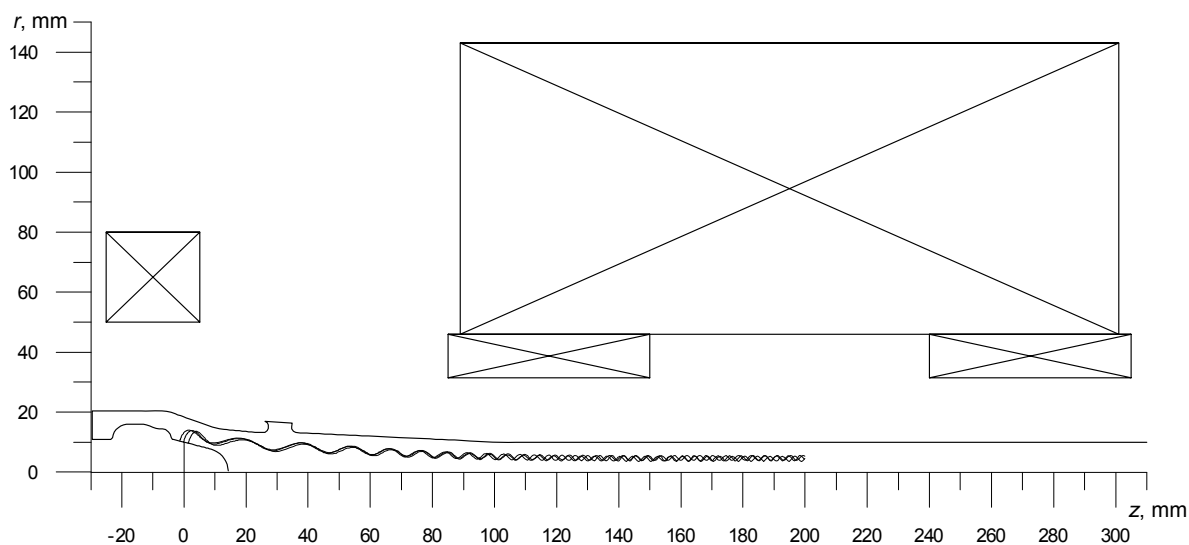


Рис. 2. Эскиз электронно-оптической и магнитной систем технологического гиротрона

Таблица 1

Основные параметры технологического гиротрона

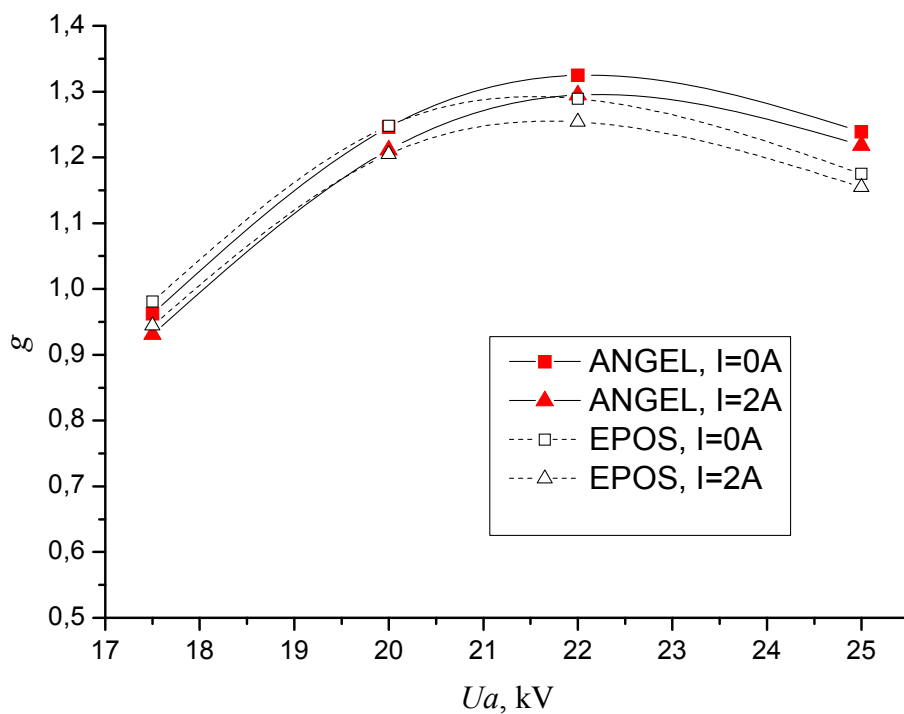
Показатель	Параметры
Тип пушки	Триодная
Частота	$f = 28$ ГГц (2 гармоника)
Рабочее магнитное поле	$B_0 = 5,2$ кГс
Ускоряющее напряжение	$U_0 = 25$ кВ
Анодное напряжение	$U_a = 17..25$ кВ
Ток пучка	$I_0 = 2$ А
Радиус ведущих центров электронного пучка в пространстве взаимодействия	$R_0 = 4,52$ мм
Рабочая мода	TE ₀₂
Средний радиус эмиттера	$R_k = 10$ мм
Расстояние от центра эмиттера до центра магнитной системы	$Z_s = 195$ мм

Траектории электронов интегрировались до некоторой плоскости Z_s (где уже отсутствуют скрещенные поля), с которой питч-фактор и скоростной разброс пересчитывались на плоскость центра резонатора по адиабатическим формулам.

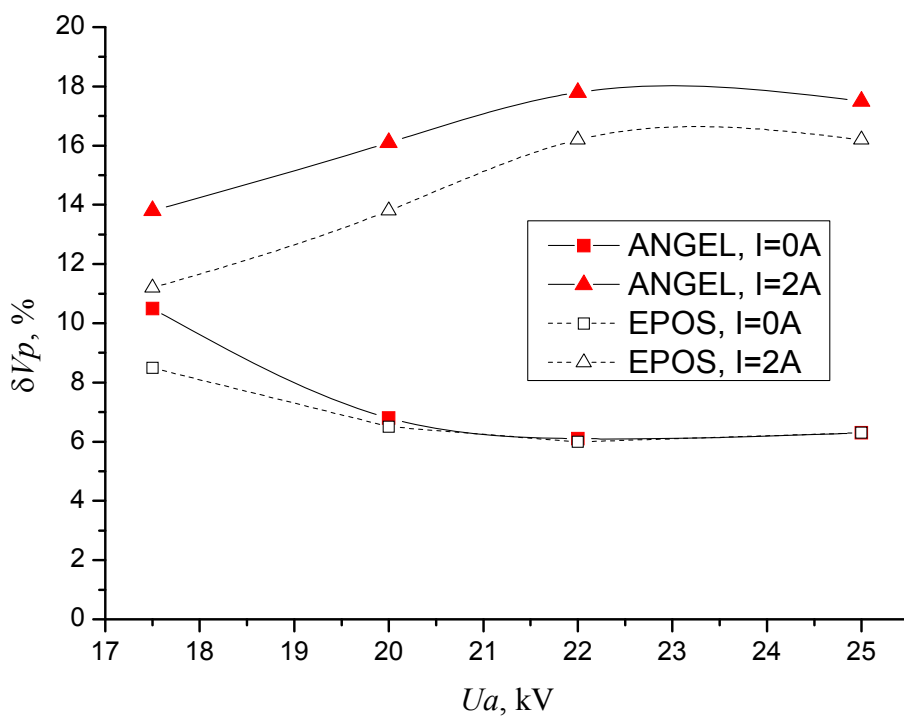
На рис. 3 приведены зависимости питч-фактора и относительного разброса осцилляторных скоростей от анодного напряжения U_a при токах пучка 0 и 2 А, полученные без учета начального разброса скоростей. Можно утверждать, что при анодном напряжении U_a близком к 22 кВ питч-фактор достигает своего максимума при приемлемой величине скоростного разброса.

При анодном напряжении близком к оптимальному (22 кВ) были получены зависимости питч-фактора и относительного разброса осцилляторных скоростей от тока катодной катушки, представленные на рис. 4. При увеличении магнитного поля в области катода (увеличении тока катодной катушки) питч-фактор монотонно падает, что согласуется с положениями адиабатической теории, поскольку $g \sim 1/B$, а величина скоростного разброса остается практически неизменной.

Результаты расчетов с начальным скоростным разбросом при анодном напряжении $U_a = 22$ кВ и токе катодной катушки $I_{cath} = 4,5$ А

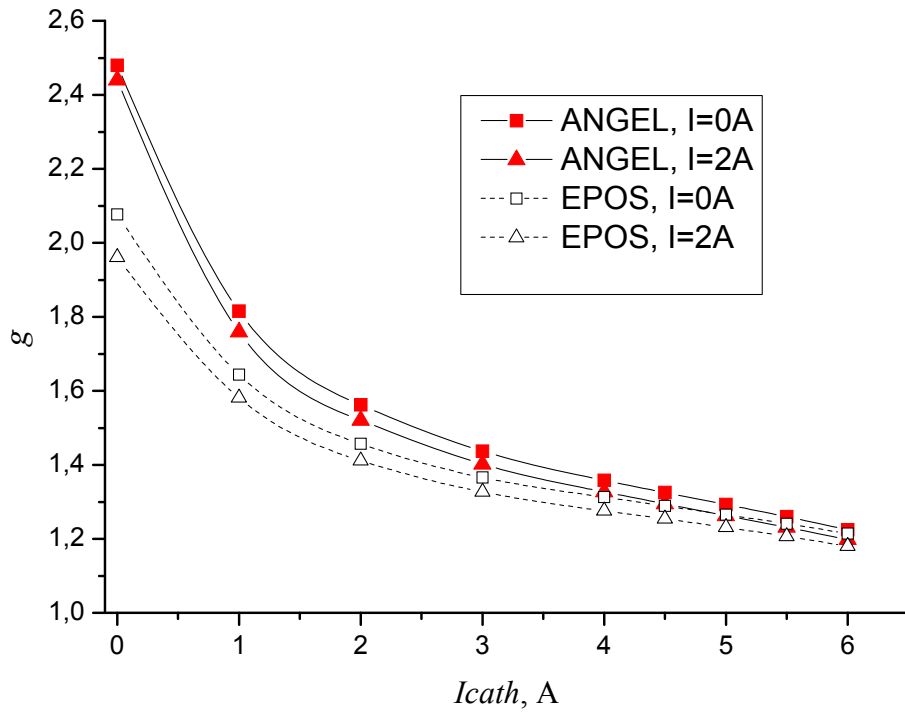


а

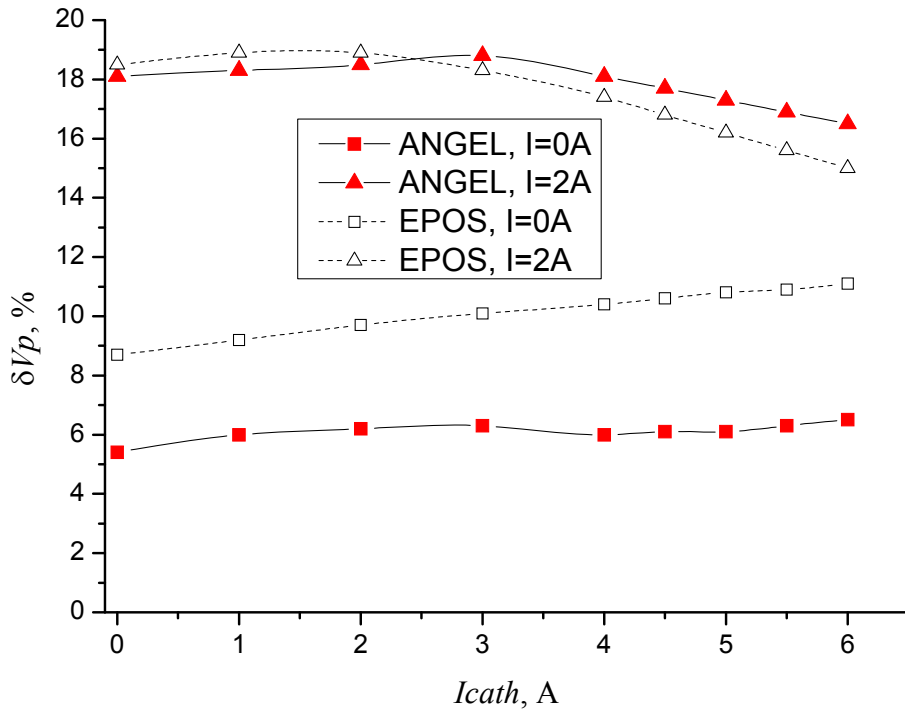


б

Рис. 3. Зависимость питч-фактора (а) и относительного разброса осцилляторных скоростей (б) от анодного напряжения U_a при токах пучка 0 и 2 А без учета начального разброса скоростей электронов



а



б

Рис. 4. Зависимость питч-фактора (а) и относительного разброса осцилляторных скоростей (б) от тока катодной катушки при анодном напряжении 22 кВ без учета начального разброса скоростей электронов

Таблица 2

Результаты расчетов с начальным скоростным разбросом

I beam, A	EPOS-V		ANGEL-2DS	
	g	$\delta V_{0,5}^+$, %	g	$\delta V_{0,5}^+$, %
0	1,293	12,7	1,325	10,7
2	1,259	18,7	1,290	17,5

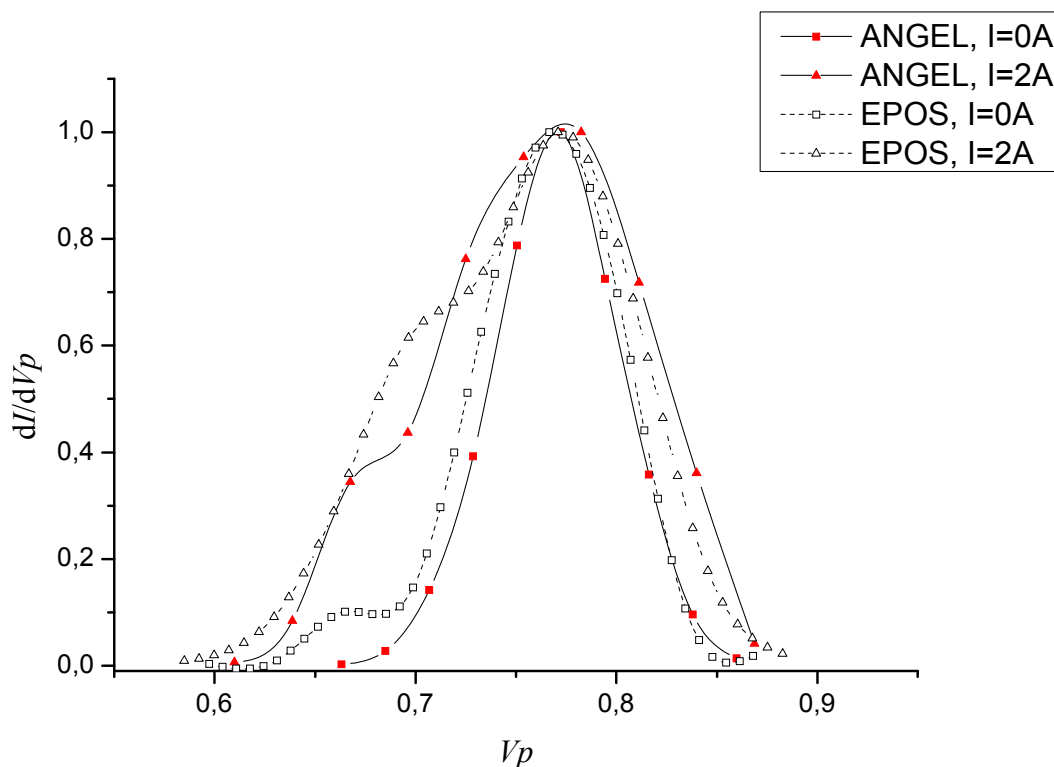


Рис. 5. Распределение электронов в резонаторе по осцилляторным скоростям при токах пучка 0 и 2 А. Максимумы функций распределения нормированы к 1, а осцилляторные скорости выражены в долях полной скорости v_a

представлены в табл. 2. При выбранных параметрах отсутствует отражение электронов от магнитной пробки, вызванной конфигурацией магнитной системы, и не происходит развития неустойчивостей электронного потока, обусловленных накоплением пространственного заряда между катодом и пробкой. Последнее обстоятельство позволяет сформировать электронный поток с параметрами, пригодными для достижения относительно высокого КПД генерации. Влияющие на величину КПД функции распределения электронов по осцилляторным скоростям в пространстве взаимодействия (чем больше разброс, тем меньше макси-

мально достижимый КПД), полученные при расчетах программами ANGEL-2DS и EPOS-V представлены на рис. 5.

При расчетах в ANGEL-2DS использовалось гауссово начальное распределение скоростей с параметрами: $V_{\max} = 0,04$, $f(V_{\max}) = 0,01$, а в EPOS-V – близкое к гауссову распределение, полученное из обработки результатов экспериментов. Различие начальных условий привело к незначительной разнице в результирующих распределениях в области малых осцилляторных скоростей.

Оценить достоверность полученных результатов можно исходя из экспериментальных данных. Зависимость выходной

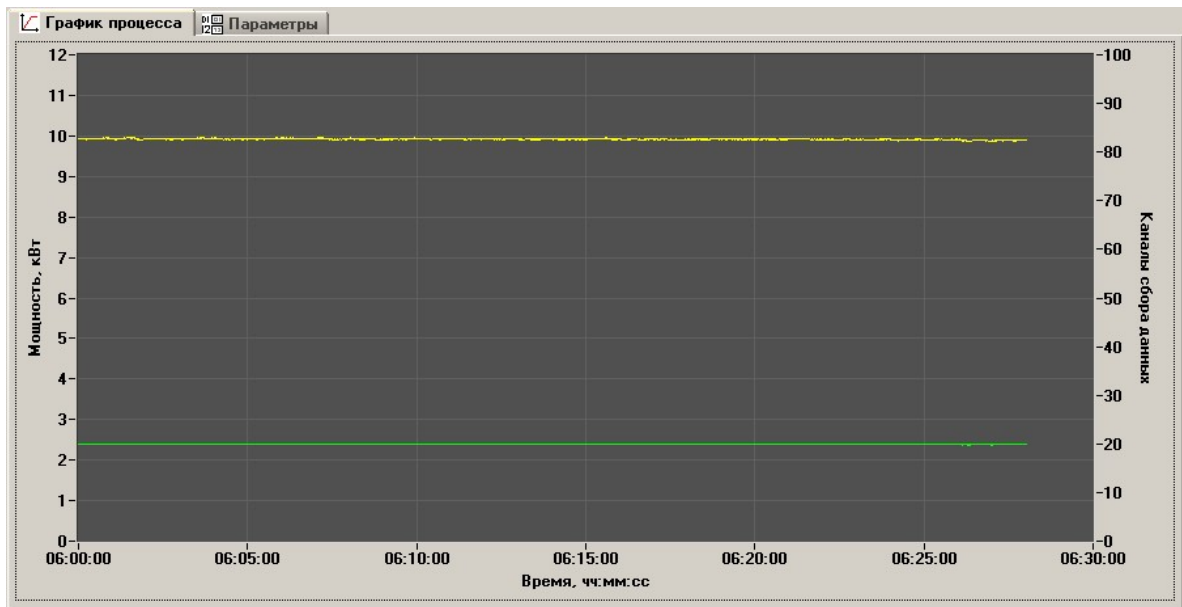


Рис. 6. Зависимость выходной мощности и КПД гиротрона от времени при работе на калориметр

мощности от времени при фиксированных токе (2 А) и напряжении (25 кВ) представлена на рис. 6. В этом режиме КПД генерации составляет около 20 % при мощности 10 кВт. КПД гиротрона описывается известной формулой

$$\eta = \frac{g^2}{1+g^2} \eta_{\text{пер}} \left(1 - \frac{Q}{Q_{\text{ом}}} \right),$$

где $\frac{g^2}{1+g^2}$ – доля вращательной энергии электронов; $\eta_{\text{пер}}$ – эффективность передачи вращательной энергии электронов высокочастотному полю; фактор $\left(1 - \frac{Q}{Q_{\text{ом}}} \right)$ учитывает омические потери в резонаторе.

Используя известные графики, определяющие значение $\eta_{\text{пер}}$ от параметров рабочего режима [24], можно найти, что для имевших место в эксперименте характеристик резонатора, тока и напряжения электронного пучка $\eta_{\text{пер}} \approx 0,4$. Исходя из результатов расчета электродинамической системы $\left(1 - \frac{Q}{Q_{\text{ом}}} \right) \approx 0,9$, получаем $g \approx 1,3$,

что согласуется с результатами расчетов. Стабильность выходной мощности свидетельствует об отсутствии каких-либо неустойчивостей в процессе работы. Относительно низкий КПД в данном эксперименте (полученное значение соответствует результатам, получаемым в большинстве зарубежных аналогов, но ниже, чем в гиротронах, поставляемых ИПФ РАН / ГИКОМ заказчикам [25]) связан с отсутствием оптимизации распределения магнитного поля вдоль оси системы и недостаточной (меньшей, чем оптимальная) величиной тока, что обусловлено высоковольтным источником питания, использованном в ходе эксперимента.

Заключение

Результаты численного моделирования показывают возможность формирования однородных винтовых электронных пучков с большой долей вращательной энергии, что позволяет достигать высокой эффективности гиротронов, предназначенных для микроволновой обработки материалов. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными оценками параметров элек-

тронного потока, сделанными на основании измерения КПД.

Список литературы

1. Applications of High Power Microwaves / Eds. A. V. Gaponov-Grekhhov, V. L. Granatstein. Boston; L.: Artech House Microwave Library, 1994.
2. Гольденберг А. Л., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е., Литвак А. Г., Флягин В. А. Мазеры на циклотронном резонансе: состояние и проблемы // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 635.
3. Bratman V. L., Glyavin M. Yu., Kalynov Yu. K., Litvak A. G., Luchinin A. G., Savilov A. V., Zapevalov V. E. Terahertz Gyrotrons at IAP RAS: Status and New Designs // Int. J. IRMM&THz Waves. 2011. Vol. 32. No. 3. P. 371–379.
4. Felch K. L., Danly B. G., Jory H. R., Kreisher K. E., Lawson W., Levush M., Temkin R. J. Characteristics and Applications of Fast-Wave Gyrodevices // Proc. of the IEEE. 1999. Vol. 87. No. 5. P. 752.
5. Chu K. R. The Electron Cyclotron Maser // Reviews of Modern Physics. 2004. Vol. 76. P. 490.
6. Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения // УФН. 2011. Т. 181. С. 8.
7. Гольденберг А. Л., Петелин М. И. Формирование винтовых электронных пучков в адиабатической пушке // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 1. С. 141.
8. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков: Пер. с англ. Н. Новгород, 2012. 576 с.
9. Hermansfeldt W. B. Electron Trajectory Program // SLAC. 1979. Vol. 226.
10. Lygin V. K. Numerical Simulation of Intense Helical Electron Beams with the Calculation of the Velocity Distribution Functions // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1995. Vol. 16. No. 2. P. 363–376.
11. Лыгин В. К., Цимринг Ш. Е. Расчет электронных траекторий в винтовых пучках, формируемых аксиально-симметричными магнетронно-инжекторными пушками // ЖТФ. 1973. Т. 43, № 8. С. 1695.
12. Куфтин А. Н., Белов С. П. Магнитно-экранированная электронно-оптическая система гиротрона в режиме ограничения тока пространственным зарядом // Прикладная физика. 2000. № 3. С. 76.
13. Цимринг Ш. Е. О разбросе скоростей в винтовых электронных пучках // Изв. вузов. Радиофизика. 1972. Т. 15, № 8. С. 1247.
14. Мануилов В. Н., Райский Б. В., Солуянова Е. А., Цимринг Ш. Е. Теоретическое и экспериментальное исследование магнетронно-инжекторных пушек в режиме ограничения тока пространственным зарядом // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, № 4. С. 648.
15. Krivosheev P. V., Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. Numerical Simulation Models of Focusing Systems of Intense Gyrotron Helical Electron Beams // Int. J. of Infrared and MM Waves. 2001. Vol. 22. No. 8. P. 1119.
16. Планкин О. П., Семёнов Е. С. Комплекс программ ANGEL-2DS для моделирования пушки гиротрона: Инструкция для пользователя. Н. Новгород, 2011. 32 с.
17. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики. М.: Наука, 1985.
18. Алиевский Б. Л., Орлов В. Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983. 112 с.
19. Семёнов Е. С., Юнаковский А. Д. Расчет статического магнитного поля системы соленоидов // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 12.
20. Пензяков В. В. Расчет электронных пушек на электронных цифровых машинах // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1966. № 1. С. 41–49.
21. 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. № 7 (401). С. 36–38.
22. Вашковский А. В., Овчаров В. Т. К нахождению распределения потенциала в области, ограниченной заданными формами с заданными потенциалами // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1971. № 9. С. 34.
23. Bykov Yu., Denisov G., Ereemeev A., Gorbatushkov V., Kurkin V., Kalynova G., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I. 28 GHz 10 kW Gyrotron System for Electron Cyclotron Resonance Ion Source // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 75. P. 1437.

24. Нусинович Г. С., Эрм Р. М. КПД МЦР-монофона с гауссовым продольным распределением ВЧ поля // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1972. Т. 8. С. 55–60.

25. Вуков Ю., Еремеев А., Глявин М., Холотцев В., Лучинин А., Плотников И., Де-

nisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N. 24–84 GHz Gyrotron Systems for Technological Microwave Applications // IEEE Transactions on Plasma Science, 2004. Vol. 32. No. 1. P. 67.

Материал поступил в редколлегию 30.11.2012

O. P. Plankin, E. S. Semenov

TRAJECTORY ANALYSIS OF THE ELECTRONIC-OPTICAL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL GYROTRON

The results of numerical modeling of the helical electronic beam formation system for technological gyrotron with operating frequency of 28 GHz are presented. The new code «ANGEL-2DS» designed to calculate the parameters of helical electronic beams in gyro-devices is described. Mathematical methods used in the code are briefly stated. We carried out the gyrotron trajectory analysis for the case of its usage for microwave processing of materials. The possibility of the formation of homogeneous helical electronic beams with a high degree of rotational energy is shown. The comparison of the calculated data obtained by various software with the experimental data is fulfilled. Accordance of calculation results to estimates of the electron beam parameters which are obtained by efficiency measurement is shown.

Keywords: gyrotron, electronic optics, numerical modeling.