



## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГИРОТРОНОВ С НАРУШЕНИЯМИ АЗИМУТАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ\*

*Е. С. Семенов, О. П. Планкин, Р. М. Розенталь*

Институт прикладной физики Российской академии наук

Представлен алгоритм моделирования систем формирования винтовых электронных пучков для запитки гиротронов, позволяющих учитывать типичные виды нарушений азимутальной симметрии системы. Выполнен анализ магнетронно-инжекторной пушки гиротрона диапазона 260 ГГц на второй гармонике гирочастоты в условиях смещения оси пучка в пределах 0.5 мм. Показано, что наличие несоосности оказывает значительное влияние на азимутальное распределение пичч-фактора.

*Ключевые слова:* Гиротрон, электронная оптика, магнетронно-инжекторные пушки.

### Введение

Электронно-оптическая система (ЭОС), формирующая винтовые пучки с заданными значениями энергии, тока и отношением осцилляторной и продольной скоростей электронов, является ключевым компонентом гирорезонансных источников СВЧ-излучения. Несмотря на более чем полувековую историю таких источников, они остаются на передовых позициях с точки зрения мощности излучения вплоть до терагерцового диапазона [1]. В последние годы к «классическим» применениям гирорезонансных приборов в областях микроволновой обработки материалов и системах нагрева плазмы [2] добавились такие направления, как дистанционная диагностика радиоактивных материалов [3], медицинские и физические исследования на основе эффекта динамической поляризации ядер [4], контроль качества продуктов питания [5].

Расширение областей практического применения гирорезонансных источников обуславливает прогресс в моделировании электронно-оптических систем формирования винтовых пучков. Следует отметить, что в последние годы предложен ряд инновационных научно-технологических решений для инжекционных компонент таких систем: катод на основе углеродных нанотрубок [6], двухэлектродный сегнетоэлектрический катод с высокой частотой повторения импульсов [7], терморасширенный графитовый катод [8]. Для ослабления проблем конкуренции мод и

\*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на XVI Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015.

повышения эффективности генерации целый ряд исследовательских групп готовят проекты двухпучковых электронно-оптических систем [9,10].

Большая часть программ траекторного анализа использует приближение азимутальной симметрии пространства электронно-оптической системы. Однако в ряде случаев такое приближение уже не может считаться допустимым. К примеру, согласно современным данным, относительное изменение плотности тока инжекции по угловой координате катода может достигать величины порядка 90% [12]. В свою очередь, это вызывает азимутальные вариации запасенной в формируемом винтовом пучке поперечной энергии более 10%, что неизбежно сказывается на КПД всего прибора. Кроме того, повышение требований к эффективности и надежности работы гиротронов определяет необходимость учета в расчетах ЭОС таких явлений, как неоднородность эмиссии, несоосность и перекося силовых полей и др.

### Математическая модель

Традиционные алгоритмы анализа ЭОС на базе методов трубок тока и дискретных источников легли в основу программного комплекса ANGEL (ANalyzer of a Gyating Electrons), разработка которого ведётся в ИПФ РАН с опорой на опыт имеющихся в ИПФ РАН и ННГУ наработок [13–16]. Данный программный комплекс позволяет рассчитывать траектории электронов в статическом электромагнитном поле в режиме температурного ограничения эмиссии с учётом начального скоростного разброса и пространственного заряда пучка [17].

При описании используемых в программе алгоритмов ограничимся сначала рассмотрением случая азимутальной симметрии электрического и магнитного полей, а также симметричной эмиссией электронов с катода. Моделирование электронных пучков с винтовыми траекториями проводится в программе путем численного решения системы уравнений движения

$$\frac{\partial(\gamma\mathbf{v})}{\partial t} = \eta(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \frac{\partial\mathbf{r}}{\partial t} = \mathbf{v}, \quad \mathbf{r}|_{t=0} = \mathbf{r}_0 \quad \mathbf{v}|_{t=0} = \mathbf{v}_0, \quad (1)$$

уравнения Пуассона и уравнения непрерывности [18]

$$\mathbf{E} = -\nabla U, \quad \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\rho, \quad U|_{\Gamma} = U_B, \quad \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad (2)$$

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  $\mathbf{B}$  – напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля, соответственно;  $\rho$  и  $\mathbf{j} = \rho\mathbf{v}$  – плотности пространственного заряда и тока электронного пучка; потенциал  $U_B$  на границе соответствует потенциалу электродов ЭОС.

Траекторный анализ потока электронов производится методом трубок тока, традиционно используемым для решения статических задач [19], 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. Поток частиц,

вылетающих с эмиттера, разбивается на  $N$  трубок тока (каждая из них несёт 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  $\Delta t$  – 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 позволяет определить траектории каждой токовой трубки и распределение плотности пространственного заряда. На следующих итерациях электрическое поле находится из решения уравнения Пуассона с плотностью  $\rho$ , вычисленной на предыдущей итерации, и затем вновь рассчитываются электронные траектории.

Магнитное поле полагается внешним, его индукция  $\mathbf{B}$  создаётся системой соленоидов с прямоугольным продольным сечением. Магнитная индукция азимутально-симметричного соленоида с прямоугольным продольным сечением определяется азимутальной компонентой векторного потенциала  $A_\varphi$  [20]

$$\mathbf{B} = (B_r, 0, B_z), \quad B_r(r, z) = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \quad B_z(r, z) = \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} + \frac{A_\varphi}{r},$$

$$A_\varphi = \int_0^\pi d\varphi \int_{a_1}^{a_2} d\tilde{r} \int_{g_1}^{g_2} d\tilde{z} W(r, z, \tilde{r}, \tilde{z}, \varphi), \quad W = \frac{\tilde{r} \cos \varphi}{\sqrt{R}}, \quad (3)$$

где  $R(r, z, \tilde{r}, \tilde{z}, \varphi) = (\tilde{z} - z)^2 + \tilde{r}^2 + r^2 - 2r\tilde{r} \cos \varphi$ . Расчёт поля оптимизирован посредством аналитического вычисления интегралов по радиальной и продольной координатам, что значительно увеличивает точность и скорость расчёта [21].

Электрическое поле находится методом дискретных источников (МДИ), применение которого эффективно по причине малого объема, занимаемого электронным потоком относительно полного объема межэлектродного пространства гироприбора [22,23]. Сущность МДИ сводится к представлению скалярного потенциала  $U$  линейной комбинацией дискретных источников – «виртуальных зарядов»  $Q_i$ , расположенных вдоль границы в точках  $(\rho_i, \zeta_i)$ , отстоящих от поверхности электродов «вглубь» металла на расстояние порядка шага,

$$E = -\nabla U, \quad U(r, z) = \sum_{i=1}^N Q_i G(r, z, \rho_i, \zeta_i) + U_S(r, z), \quad G(r, z, \rho_i, \zeta_i) = C_0 F(k) \chi^{-1/2},$$

$$C_0 = \frac{1}{2\pi^2 \varepsilon_0}, \quad F(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta}}, \quad k^2 = \frac{4r\rho_i}{\chi}, \quad \chi = (r + \rho_i)^2 + (z - \zeta_i)^2. \quad (4)$$

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

$$U_s(r, z) = \sum_{m=1}^M Q_m G(r, z, \rho_m, \zeta_m) \quad (5)$$

с той же функцией Грина  $G$ , что и при нахождении потенциала на границе;

$M$  – общее количество ячеек сетки для учёта пространственного заряда электронного пучка.

Величины вспомогательных зарядов  $Q_i$  находятся из системы линейных алгебраических уравнений, полученной проверкой граничного условия (равенство потенциала заданному  $U_B$ ) в дискретных точках границы, расположенных с некоторым шагом на поверхности электродов и называемых точками коллокации,

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N Q_i G(r_j, z_j, \rho_i, \zeta_i) = U_B(r_j, z_j) - U_S(r_j, z_j), \\ j = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (6)$$

Производные потенциала по направлениям берутся аналитически. Следуя [24], для оптимизации времени счёта реализована работа с сеткой «укрупнённых зарядов». Для интегрирования уравнения движения используются методы Рунге–Кутты 4-го порядка (обычный и с модификацией Мерсона, позволяющей вести контроль точности на каждом шаге).

Сравнение результатов моделирования магнетронно-инжекторных пушек в широком диапазоне энергетических параметров (от десятков до сотен кэВ) с данными, полученными на основе программного комплекса ЭПОС [16], подтвердило работоспособность программного комплекса ANGEL как при расчете слаборелятивистских пушек [25], так и в диапазоне умеренного релятивизма с энергией электронов 250–300 кэВ.

Продвижение в область более высоких частот (субтерагерцовых и терагерцовых) значительно обостряет проблематику влияния несоосностей электронно-оптической системы на работу гиротронов. Для решения подобных задач была начата работа по модификации программного комплекса ANGEL для обеспечения возможностей полноценного трехмерного моделирования электронно-оптических систем.

На первом этапе был реализован учёт азимутально-несимметричного пространственного заряда, обусловленного зависящими от азимутальной координаты точками старта траекторий, распределения начальных скоростей и токов в этих точках. В этом случае поток частиц, вылетающих с эмиттера, дополнительно разбивается на  $L$  азимутальных секторов. Геометрия электродной системы считается аксиально-симметричной; влияние пространственного заряда на граничные условия учитывается усредненно по азимуту, что оправданно в случае умеренных значений неоднородности эмиссии. Также реализован алгоритм моделирования ЭОС с несоосностью электродной и магнитной подсистем. При этом сами подсистемы остаются азимутально-симметричными, однако формируемые такой системой электронный пучок и пространственный заряд оказываются несимметричными.

## 1. Результаты численных экспериментов

Исследование влияния несоосности электронного пучка было проведено для ЭОС гиротрона диапазона 260 ГГц на второй гармонике гирочастоты [26]. Магнетронно-инжекторная пушка данного гиротрона формирует винтовой электронный пучок со средним радиусом 0.984 мм, энергией 15–20 кВ, током 0.5 А, питч-фактором

1.2–1.4. Полученный пучок используется для возбуждения моды  $TE_{-2,3,1}$  в резонаторе радиусом 1.844 мм. В эксперименте максимальная мощность излучения на частоте 258.6 ГГц достигала 180 Вт при КПД 3.7% [27]. Интерпретация экспериментальных данных позволяла сделать вывод, что в системе имела место несоосность электронного пучка и резонатора [28]. Величина такой несоосности находится в пределах 0.5 мм, поскольку при больших значениях электронный пучок, с учётом его расплывания и паразитной эмиссии вне эмитирующего пояса катода, задевал бы поверхность электродинамической системы гиротрона.

На рис.1 представлено схематическое изображение исследуемой магнетронно-инжекторной пушки и траектории электронов.

Для расчёта среднего радиуса и ширины пучка в каждом азимутальном сечении выполнялась аппроксимация гауссовой кривой с учётом тока электронных трубок, составляющих пучок. При таком подходе математическое ожидание взвешенных по току радиусов трубок имеет смысл среднего радиуса пучка, а среднеквадратичное отклонение – его ширины

$$R_m(\varphi) = \sum_k r_k I_k / I_{dir} \quad - \text{средний радиус}, \quad (7)$$

$$\sigma(\varphi) = \sqrt{\sum_k I_k (r_k - R_m)^2 / I_{dir}} \quad - \text{ширина пучка}, \quad (8)$$

где  $I_{dir} = \sum_k I_k$  – полный ток электронных трубок  $I_k$ , каждая из которых имеет радиальную координату  $r_k$ .

Геометрически пучок сохраняет симметричную форму, но за счёт перераспределения тока в нём наблюдаются азимутальная асимметрия плотности тока (рис. 2) и азимутальная асимметрия распределений среднего радиуса и ширины (рис. 3), полученные с токовыми весами.

Наиболее значимым эффектом, на наш взгляд, является нарушение симметрии пич-фактора (рис. 4, 5), отклонения которого от среднего значения достигают 15% и

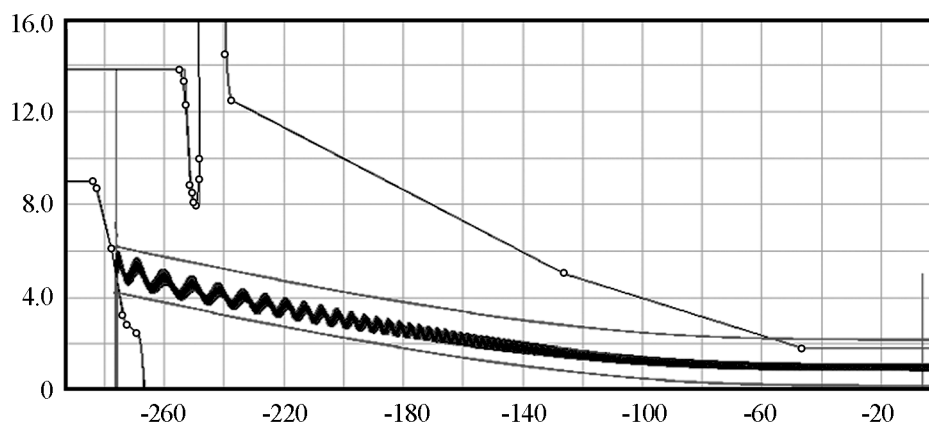


Рис. 1. Геометрия магнетронно-инжекторной пушки (использованы данные работы [26]) и траектория электронного пучка, рассчитанная кодом ANGEL. Величина несоосности 0.5 мм

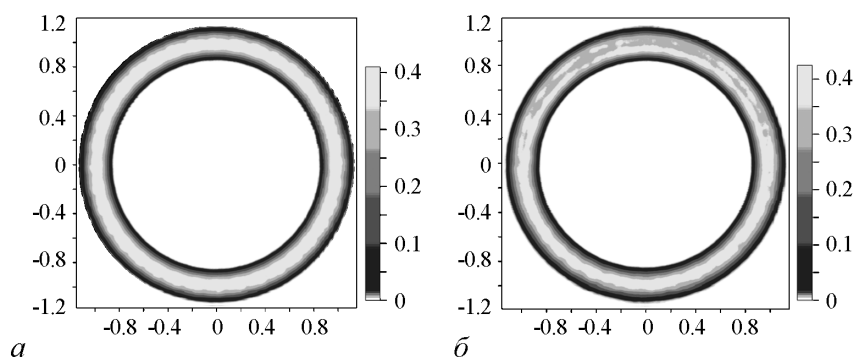


Рис. 2. Распределение плотности тока по поперечным координатам несмещенного пучка (а) и пучка со смещением 0.5 мм (б)

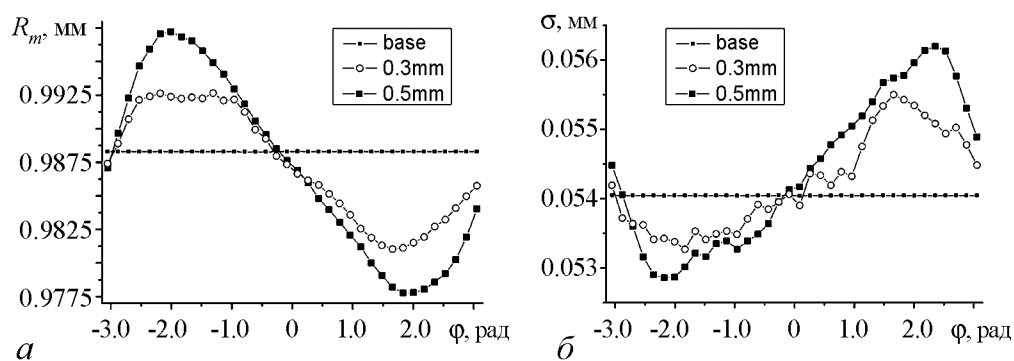


Рис. 3. Зависимость радиуса ведущего центра пучка (а) и ширины пучка (б) от азимутальной координаты при различных величинах исходного смещения

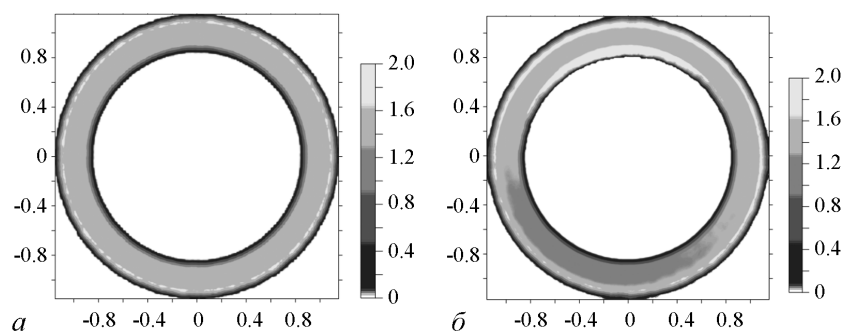


Рис. 4. Распределение пичч-фактора по поперечным координатам несмещенного пучка (а) и пучка со смещением 0.5 мм (б)

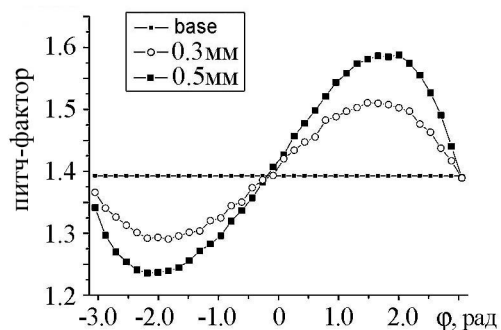


Рис. 5. Зависимость среднего по радиусу пичч-фактора от азимутальной координаты при различных величинах исходного смещения

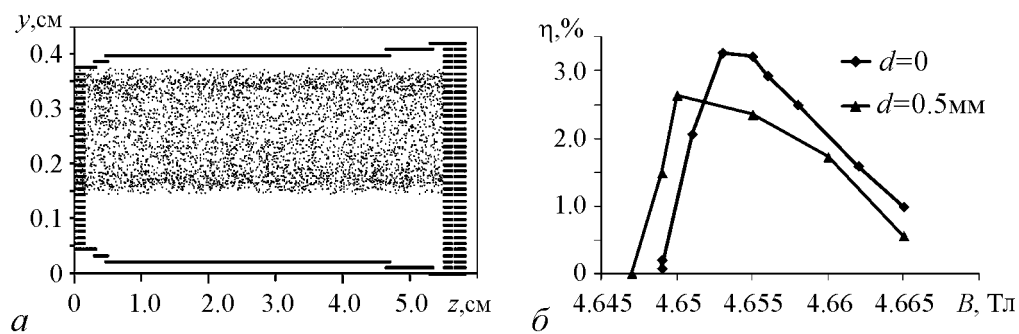


Рис. 6. Результаты трехмерного PIC-моделирования гиротрона на частоте 250 ГГц (код KARAT):  $a$  – сечение моделируемой системы и положение макрочастиц;  $b$  – зависимость эффективности генерации от магнитного поля для соосного пучка и пучка со смещением 0.5 мм

объясняются асимметрией магнитного поля на эмиттере, которая затем усиливается адиабатической накачкой.

Можно ожидать, что в сочетании с отклонением оси электронного пучка относительно оси резонатора, азимутальная несимметрия питч-фактора может оказывать значительное влияние как на эффективность генерации, так и на процессы конкуренции мод. В частности, трехмерное моделирование методом крупных частиц демонстрирует, что при максимальном смещении пучка с сохранением азимутальной симметрии падение КПД составляет величину порядка 20% (рис. 6).

### Заключение

Первые результаты моделирования демонстрируют значительное влияние несоосности узла инжекции электронов на параметры формируемого винтового пучка и как следствие эффективность электронно-волнового взаимодействия. Кроме очевидного эффекта смещения оси пучка, наличие несоосности приводит к заметному нарушению азимутальной симметрии питч-фактора.

Предполагается дальнейшее развитие программного комплекса ANGEL, в рамках которого будет выполнена модификация метода дискретных источников для адекватного моделирования конфигураций со значительной несимметрией пространственного заряда. В случае трехмерной границы напрямую использовать описанный в статье подход не представляется возможным, поскольку возникающая при этом система линейных алгебраических уравнений не может быть размещена в памяти рабочей станции и решена за приемлемое время. Но учитывая, что влияние электрического поля спадает пропорционально расстоянию до заряженной частицы, появляется возможность вместо одного полного покрытия поверхности граничных электродов «трехмерными» дискретными источниками и точками коллокации секционировать границу и для каждого участка организовать своё независимое покрытие, которое будет «трехмерным» в пределах этого участка и «двумерным» во всех остальных участках. На том участке границы, где заданы «трехмерные» источники, влияние несимметричного пространственного заряда будет учтено точно, а на дальних «двумерных» участках граничное условие будет выполняться с учётом усреднённого по азимуту пространственного заряда. В каждой точке интегрирования траектории элект-

трона фактически будет использовано то покрытие, которое соответствует его текущей продольной координате для максимально точного учёта асимметрии пространственного заряда.

Реализация данного подхода позволит вывести программный комплекс ANGEL на уровень лучших программ численного моделирования электронно-оптических систем.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-41-02608.*

### **Библиографический список**

1. Guide to State-of-the-Art Electron Devices / Edited by Prof. Dr. J.N. Burghartz. John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
2. *Thumm M.* Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42, № 3. P. 590.
3. *Singh U., Kumar N., Sinha A.K.* Magnetron injection gun for a short pulse, 0.67 THz gyrotron for remote detection of radioactive materials // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2014. Vol. 4, № 4. P. 509.
4. *Glyavin M.Yu., Ginzburg N.S., Goldenberg A.L., Denisov G.G., Luchinin A.G., Manuilov V.N., Zapevalov V.E., Zotova I.V.* THz gyrotrons: Status and possible optimizations // Terahertz Science and Technology. 2012. Vol. 5, № 2. P. 67.
5. *Han S.-T., Park W.K., Chun H.S.* Development of sub-THz gyrotron for real-time food inspection // 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2011. P. 1.
6. *Yuan X., Li X., Huang Y., Pu W., Van Y.* Research on a magnetron injection electron gun based on carbon nanotube cold cathode // Technical Digest of 27th International Vacuum Nanoelectronics Conference, 6–10 July, 2014, Engelberg, Switzerland, P. 1-13.
7. *Orbach Y., Ben-Moshe R., Pilosof M., Einat M.* Gyrotron with dual electrode ferroelectric cathode operating at high repetition rate and long pulse // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61, № 3. P. 921.
8. *Akimov P.L., Kuzmich C.V., Melnychuk V.A., Nikitin A.P., Chudin V.G., Sechin H.E., Chadaev N.N., Bohoslovskaya A.B.* Project of electron gun for microwave devices with thermally expanded graphite cathodes // 10th International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC). Saint Petersburg, 30 June–4 July, 2014. P. 1.
9. *Fu W., Yan Y., Yuan X., Liu S.* Two-beam magnetron injection guns for coaxial gyrotron with two electron beams // Phys. Plasmas. 2009. Vol. 16. P.023103.
10. *Kumar N., Singh U., Kumar A., Khatun H., Sinha A.K.* On the design of a high-efficiency double-beam gyrotron // IEEE Transactions on Plasma Science. 2011. Vol. 39, № 9. P. 1781.
11. *Glyavin M., Manuilov V., Idehara T.* A double-beam magnetron-injection gun for third-harmonic continuous wave 1-THz gyrotron // Physics of Plasmas. 2013. Vol. 20. P. 123303.



12. *Louksha O.I., Samsonov D.B., Sominski G.G., Syomin S.V.* Suppression of emission nonuniformity effect in gyrotrons // 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2014. P. 1.
13. *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.
14. *Цимринг Ш.Е.* О разбросе скоростей в винтовых электронных пучках // Изв. вузов. Радиофизика. 1972. Т. 15, № 8. С. 1247.
15. *Мануилов В.Н., Райский Б.В., Солюянова 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.
16. *Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E.* Numerical simulation models of focussing systems of intense gyrotron helical electron beams // Int. J. of Infrared and MM waves. 2001. Vol. 22, № 8. P. 1119.
17. *Планкин О.П., Семенов Е.С.* Комплекс программ ANGEL-2DS для моделирования пушки гиротрона. Инструкция для пользователя: Методическая разработка. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2011. 32 с.
18. *Цимринг Ш.Е.* Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков / Пер. с англ. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 с.
19. *Ильин В.П.* Численные методы решения задач электрофизики. М.: Наука, 1985.
20. *Алиевский Б.Л., Орлов В.Л.* Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983. 112 с.
21. *Семёнов Е.С., Юнаковский А.Д.* Расчет статического магнитного поля системы соленоидов // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 12. С. 799.
22. *Пензяков В.В.* Расчёт электронных пушек на электронных цифровых машинах // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1966. № 1. С. 41.
23. *Ваишковский 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.
24. *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.
25. *Планкин О.П., Семенов Е.С.* Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона // Вестник НГУ. Сер. «Физика». 2013. Т. 8, № 2. С. 44.
26. *Запевалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Седов А.С., Цалолыхин В.И.* Система формирования электронного пучка для гиротрона с частотой 258 ГГц, предназначенного для экспериментов по динамической поляризации ядер // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 251.

27. Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запезалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалолыхин В.И. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике для спектроскопии динамически поляризованных ядер // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.
28. Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Мусеев М.А., Седов А.С. Влияние несоосности электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 6. С. 444.

## References

1. Guide to State-of-the-Art Electron Devices / Edited by Prof. Dr. J.N. Burghartz. John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
2. Thumm M. Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42, № 3. P. 590.
3. Singh U., Kumar N., Sinha A.K. Magnetron injection gun for a short pulse, 0.67 THz gyrotron for remote detection of radioactive materials // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2014. Vol. 4, № 4. P.509.
4. Glyavin M.Yu., Ginzburg N.S., Goldenberg A.L., Denisov G.G., Luchinin A.G., Manuilov V.N., Zapevalov V.E., Zotova I.V. THz gyrotrons: Status and possible optimizations // Terahertz Science and Technology. 2012. Vol. 5, № 2. P. 67.
5. Han S.-T., Park W.K., Chun H.S. Development of sub-THz gyrotron for real-time food inspection // 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2011. P. 1.
6. Yuan X., Li X., Huang Y., Pu W., Van Y. Research on a magnetron injection electron gun based on carbon nanotube cold cathode // Technical Digest of 27th International Vacuum Nanoelectronics Conference, 6–10 July 2014. Engelberg, Switzerland. P. 1-13.
7. Orbach Y., Ben-Moshe R., Pilosof M., Einat M. Gyrotron with dual electrode ferroelectric cathode operating at high repetition rate and long pulse // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61, № 3. P. 921.
8. Akimov P.L., Kuzmich C.V., Melnychuk V.A., Nikitin A.P., Chudin V.G., Sechin H.E., Chadaev N.N., Bohoslovskaya A.B. Project of electron gun for microwave devices with thermally expanded graphite cathodes // 10th International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC). Saint Petersburg, 30 June–4 July 2014. P.1.
9. Fu W., Yan Y., Yuan X., Liu S. Two-beam magnetron injection guns for coaxial gyrotron with two electron beams // Phys. Plasmas. 2009. Vol. 16. P.023103.
10. Kumar N., Singh U., Kumar A., Khatun H., Sinha A.K. On the design of a high-efficiency double-beam gyrotron // IEEE Transactions on Plasma Science. 2011. Vol. 39, № 9. P.1781.
11. Glyavin M., Manuilov V., Idehara T. A double-beam magnetron-injection gun for third-harmonic continuous wave 1-THz gyrotron // Physics of Plasmas. 2013. Vol. 20. P. 123303.

12. *Louksha O.I., Samsonov D.B., Sominski G.G., Syomin S.V.* Suppression of emission nonuniformity effect in gyrotrons // 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2014. P. 1.
13. *Lygin V.K., Tsimring Sh.E.* // ZhTF. 1973. Vol. 43, № 8. P. 1695 (in Russian).
14. *Tsimring Sh.E.* On the spread of velocities in helical electron beams // Radiophysics and Quantum Electronics. 1972. Vol. 15, № 8. P. 952.
15. *Manuilov V.N., Rayskiy B.V., Soluyanov E.A., Tsimring Sh.E.* // Radiotekhnika i Elektronika, 1995. Vol. 40, № 4. P. 648 (in Russian).
16. *Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E.* Numerical simulation models of focussing systems of intense gyrotron helical electron beams // Int. J. of Infrared and MM Waves. 2001. Vol. 22, № 8. P. 1119.
17. *Plankin O.P., Semenov V.E.* ANGEL 2DS Program Package for Gyrotron Gun Modeling: User's Guide. Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2011 (in Russian).
18. *Tsimring Sh.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
19. *Ilyin V.P.* Numerical methods of electrophysics problem solving. M.: Nauka, 1985 (in Russian).
20. *Alievsky B.L., Orlov V.L.* Calculation of magnetic fields of axisymmetric coils: Reference guide. M.: Enegroatomizdat, 1983 (in Russian).
21. *Semenov E.S., Yunakovskiy A.D.* Calculation of the static magnetic field of a system of solenoids // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. Vol. 53, № 12. P. 717.
22. *Penzyakov V.V.* // Elektronnaya Tekhnika. Ser.1. Elektronika SVCh. 1966. Vol. 1. P. 41 (in Russian).
23. *Vashkovskiy A.V., Ovcharov V.T.* // Elektronnaya Tekhnika. Ser.1. Elektronika SVCh. 1971. № 9. P. 34 (in Russian).
24. *Lygin V.K., Manuilov V.E., Tsimring Sh.E.* // Elektronnaya Tekhnika. Ser.1. Elektronika SVCh. 1987. Vol.7 (401). P. 36 (in Russian).
25. *Plankin O.P., Semenov V.E.* Trajectory analysis of the electronic-optical system of technological gyrotron // Vestnik NSU. Series: «Physics». 2013. Vol. 8, Iss. 2. P. 44 (in Russian).
26. *Zapevalov V.E., Kornishin S.Yu., Kotov A.V., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Sedov A.S., Tsalolikhin V.I.* System for the formation of an electron beam in a 258 GHz gyrotron designed for experiments on dynamic polarization of nuclei // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. Vol. 53, № 4. P. 229.
27. *Venediktov N.P., Dubrov V.V., Zapevalov V.E., Kornishin S.Yu., Kotov A.V., Kuftin A.N., Malygin O.V., Sedov A.S., Fiks A.Sh., Tsalolikhin V.I.* Experimental study of a continuous-wave high-stability second-harmonic gyrotron for spectroscopy of dynamically polarized nuclei // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. Vol. 53, № 4. P. 237.
28. *Zavolskiy N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A., Sedov A.S.* Influence of the axial misalignment of the electron beam and the cavity on the gyrotron parameters // Radiophysics and Quantum Electronics. 2011. Vol. 54, № 6. P. 402.

*Поступила в редакцию 28.05.2015*

© *Е.С. Семенов, О.П. Планкин, Р.М. Розенталь*  
Изв. вузов «ПНД», т. 23, № 3, 2015

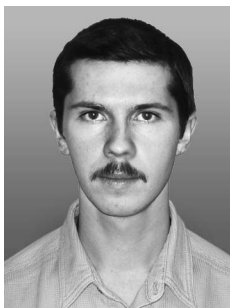
## DEVELOPMENT OF METHODS OF GYROTRONS ELECTRON-OPTICS SYSTEMS WITH AXIAL SYMMETRY DISTORTION

*E. S. Semenov, O. P. Plankin, R. M. Rozental*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences

The simulation technique of helical beam formation system of gyrotrons with typical axial symmetry distortion is presented. The simulation of the second harmonic magnetron-injection gun for 260 GHz band gyrotron with 0.5 mm beam axis displacement was made. It was shown that displacement of axis beam has a significant effect upon the angular distribution of pitch-factor.

*Keywords:* Gyrotron, electron optics, magnetron-injection gun.



*Семенов Евгений Сергеевич* родился (1980) в Дзержинске Горьковской области. Окончил ННГУ (2003) по специальности «математика». Защитил кандидатскую диссертацию (2009). С 2001 года по настоящее время – научный сотрудник ИПФ РАН. Область научных интересов: математическое моделирование. Область смежных интересов: программирование, параллельные вычисления. Количество публикаций: 6 статей в рецензируемых журналах, 3 статьи в сборниках, 2 препринта.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: semes@appl.sci-nnov.ru



*Планкин Олег Петрович* родился (1978) в Балахне Горьковской области. Окончил ННГУ (2001) по специальности «микроэлектроника и полупроводниковые приборы». Область научных интересов: электроника СВЧ, электронная оптика. В настоящее время работает в Институте прикладной физики РАН программистом. Количество публикаций 2.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: plankin@appl.sci-nnov.ru



*Розенталь Роман Маркович* родился (1977) в Горьком. Окончил радиофизический факультет ННГУ (1999) по специальности «электроника». С 1998 года работает в ИПФ РАН научным сотрудником. Основная область научных интересов – нестационарные процессы в мощных приборах вакуумной СВЧ-электроники. Автор и соавтор более 25 научных работ.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru