

## Проект низковольтного компактного гиротронного комплекса К-диапазона для СВЧ технологий

М.Д. Проявин, А.Э. Федотов, Е.С. Семенов, М.Ю. Глявин

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** в данной работе представлен проект компактного гиротронного комплекса, работающего на основном циклотронном резонансе с частотой генерации 30 ГГц. Расчетные значения параметров рабочего режима оцениваются как 5 кВ / 0.2 А при мощности генерации до 250 Вт. Особенностью комплекса является магнито-экранированная система, позволяющая обеспечить в рабочем пространстве генератора индукцию магнитного поля более 1 Тл при энергопотреблении около 5 кВт. Предложена система охлаждения, интегрированная в гиротронный комплекс и не нуждающаяся в термостабилизированном внешнем водяном контуре. Относительная дешевизна, простота и безопасность источников питания комплекса, позиционирует его в качестве широко используемого инструмента для лабораторных экспериментов в области СВЧ-технологий.

**Ключевые слова:** низковольтный гиротрон, электронно-оптическая система, энергоэффективная магнитная система, компактный источник СВЧ-излучения

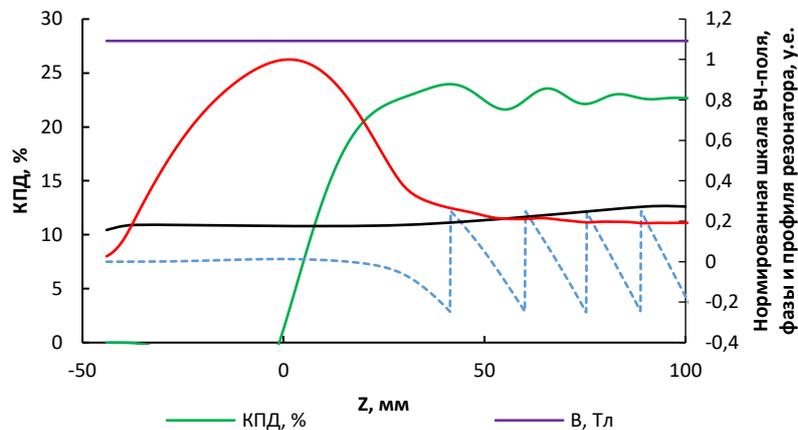
### 1. Введение

Гиротроны являются наиболее известной разновидностью мазеров на циклотронном резонансе и успешно применяются для решения широкого круга задач, включая нагрев и управление током плазмы в установках УТС, спектроскопию и диагностику различных сред, выращивание алмазных пленок и дисков, микроволновую обработку диэлектрических материалов [1]. Подавляющее число существующих гиротронных комплексов, создаваемых для микроволновых технологий, используют гиротроны, работающие на второй гармонике циклотронного резонанса, что позволяет снизить энергопотребление магнитной системы, но усложняет задачу селективного возбуждения рабочего типа колебаний [2]. Рабочие напряжения, как правило, составляют 20-30 кВ, что требует определенных усилий по созданию биологической защиты персонала. Гиротронный комплекс с малым ускоряющим напряжением рассматривается в первую очередь как лабораторный источник микроволнового излучения. В связи с этим, целевые рабочие параметры данного комплекса выбраны, исходя из создания максимально удобной, компактной и безопасной установки для проведения исследований. Рабочее напряжение высоковольтных источников питания было выбрано  $U_a = 5$  кВ, что радикально снижает их стоимость и исключает проблему рентгеновского излучения. Принципиальная возможность работы прибора, основанного на релятивистской зависимости частоты вращения электронов от их энергии, при столь низких напряжениях ранее была продемонстрирована экспериментально [3]. Генерацию на частоте 30 ГГц на основном циклотронном резонансе планируется осуществить с помощью магнито-экранированной системы (МЭС) [4], проходное отверстие которой минимизируется для снижения энергопотребления. При мощности электронного потока около 1.5 кВт дизайн коллектора должен позволять установку гиротрона в магнит коллекторной частью с прямым выводом энергии. Для формирования узконаправленных волновых пучков может быть использован внешний преобразователь. При заданной мощности излучения в несколько сотен Ватт при КПД гиротрона более 20%, ток электронного пучка предполагается равным сотням миллиампер. Итоговые значения технических

параметров определяются в процессе решения задачи электронно-волнового взаимодействия, в результате чего определяются стартовые токи рабочей моды и оптимальный с точки зрения КПД режим генерации.

## 2. Расчет электронно-волнового взаимодействия

Для минимизации проходного отверстия магнитной системы был выбран радиус резонатора  $R = 6$  мм, что позволяет обеспечить генерацию моды  $TE_{01}$  с частотой 30.5 ГГц на основном циклотронном резонансе. При этом, стартовый ток рабочей моды находится существенно ниже предполагаемого рабочего тока 200 мА. Спектр частот в окрестности рабочей моды редкий, что позволяет рассчитывать на устойчивую одномодовую генерацию. Для оптимального возбуждения рабочего типа колебаний радиус ведущих центров винтового электронного пучка (ВЭП) составляет  $R_b = 2.9$  мм на длине однородного участка магнитного поля 67 мм. Проведенный расчет и оптимизация электронно-волнового взаимодействия по системе самосогласованных уравнений с нефиксированной структурой ВЧ-поля в программе Angel [5,6] показали, что при данных параметрах возможно осуществить генерацию рабочей моды с мощностью около 230 Ватт и КПД 23%.

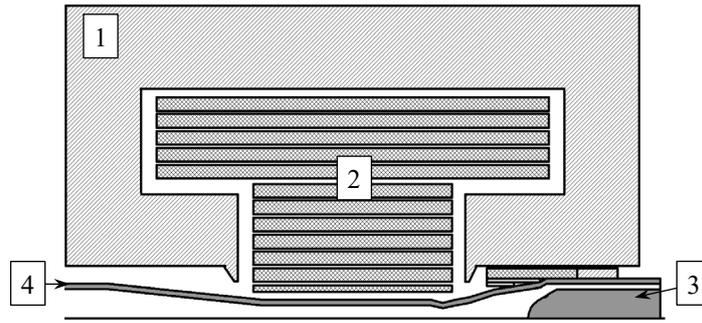


**Рисунок 1.** Результаты расчета электронно-волнового взаимодействия рабочей моды  $TE_{01}$  с частотой 30.5 ГГц. Мощность генерации составила 230 Ватт.

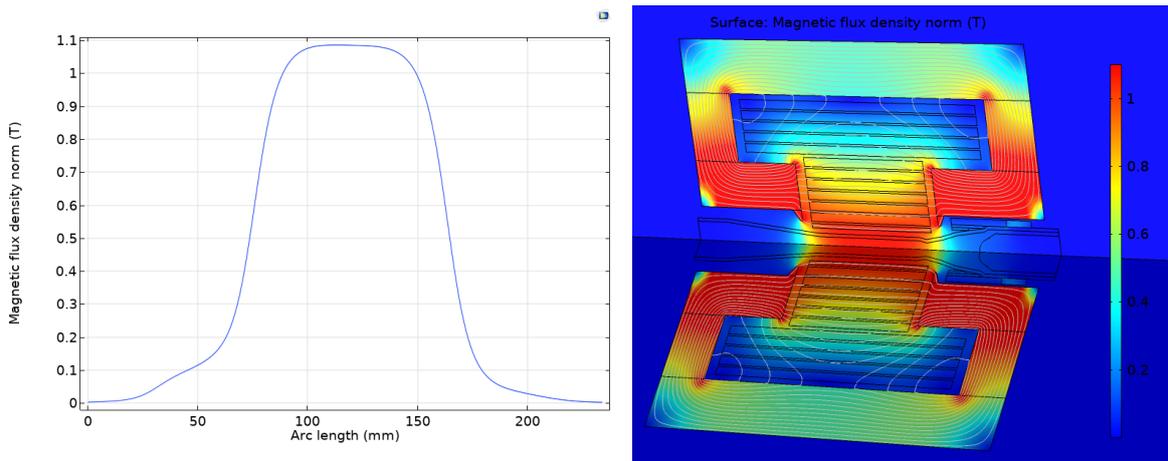
## 3. Разработка магнитной системы

Для разработки магнито-экранированной и электронно-оптической систем (ЭОС) данного гиротронного комплекса, обе задачи необходимо решать согласованно. Это связано с существенным изменением топологии силовых линий магнитного поля при варьировании формы ферромагнитных экранов МЭС [7]. В свою очередь форма внутренних экранов МЭС связана как с эффективностью работы, так и с технологическими возможностями размещения гиротрона внутри магнитной системы. В результате проведенных итераций, были разработаны конфигурация магнитной системы и электродов электронно-оптической системы, позволяющие формировать качественный с точки зрения электронно-волнового взаимодействия ВЭП. Профиль магнитной системы и электродов представлен рис. 2.

Мощность потребления магнитной системы была оптимизирована, в первую очередь, исходя из соображений уменьшения поперечных размеров обмотки и соответствующего увеличения рабочего тока соленоида. В результате оптимизации мощность потребления МЭС составила 5.3 кВт при токе  $I = 190$  А,  $U = 28$  В, количестве витков  $N = 416$  (шина  $5.6 \times 2.8$  мм<sup>2</sup>). Распределение осевого магнитного поля и цветовая карта распределения магнитного поля в пространстве приведена на рис. 3.



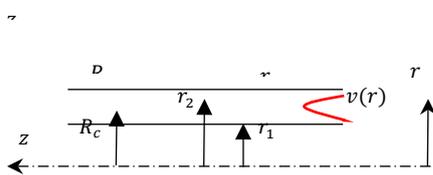
**Рисунок 2.** Профиль магнитной системы и электродов ЭОС. 1 – ферромагнитный экран, 2 – медная обмотка, 3 – катод, 4 – анод.



**Рисунок 3.** Распределение осевого магнитного поля (слева) и цветовая карта распределения магнитного поля в пространстве (справа)

#### 4. Решение тепловой задачи

Для обеспечения компактности и простоты работы СВЧ-комплекса была предложена система жидкостного охлаждения обмоток соленоида. В свою очередь, температуру хладагента предлагается поддерживать внешним радиатором, обдуваемым потоком воздуха через вентиляторы. Для проверки работоспособности такой схемы был проведен тепловой расчет в программе Comsol Multiphysics [7]. Профиль потока жидкости в коаксиальной трубе с малым поперечным сечением может быть описан формулами (1)-(2):



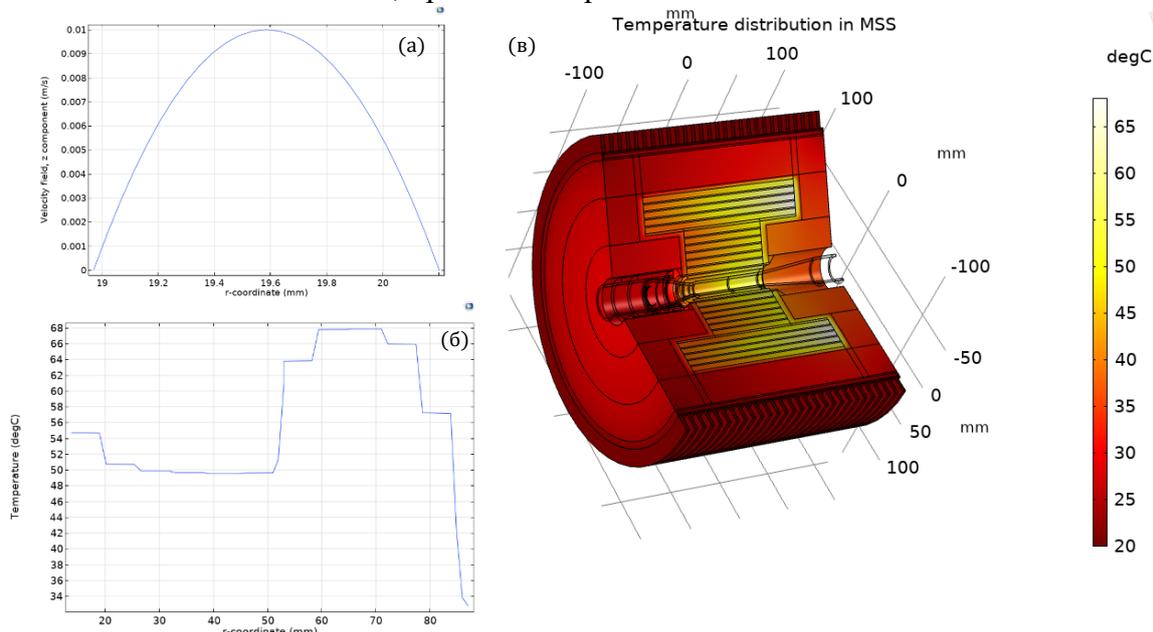
$$v(r) = v_0 * \left(1 - \frac{(r - R_c)^2}{(r_2 - r_1)^2}\right)^2 \quad (1)$$

$$q = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} v(r) r dr d\phi \quad (2)$$

где  $r$  – радиальная координата,  $r_2$  и  $r_1$  – внешний и внутренний радиусы канала,  $R_c$  - центральный радиус канала,  $v_0$  – определяется исходя из параметров расхода используемого насоса  $q$  (л/мин) и общей площади каналов с хладагентами.

В рассматриваемом случае максимальная скорость потока составила  $v_0 = 0.01$  м/с, что позволяет использовать насос малой мощности. В процессе расчета профиль скорости, изображенный на рис. 4а, был задан в каждом канале охлаждения, в результате моделирования была получена карта распределения температуры с

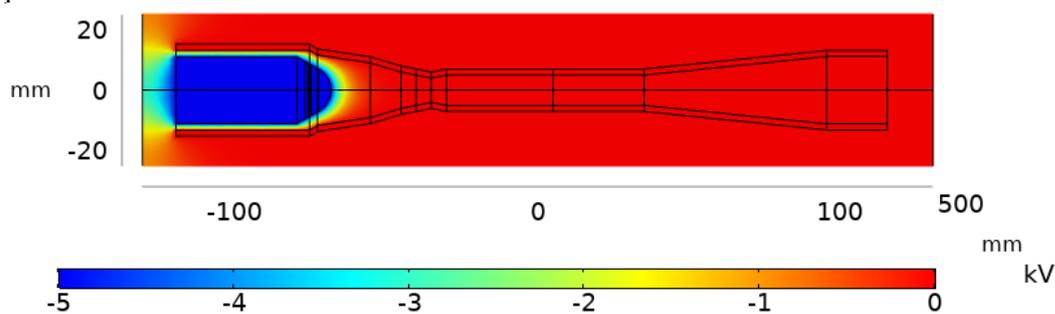
учетом наличия внешнего медного радиатора, установленного на внешнем корпусе магнита (см. рис. 4в). На данном рисунке заметно отсутствие симметрии распределения температуры внутри МЭС, что связано с потоком хладагента и его постепенным нагревом. Профиль температуры на торце обмотки, где расположены выходы каналов охлаждения, приведен на рис. 4б.



**Рисунок 4.** Профиль скорости потока хладагента в канале охлаждения (а), профиль температуры на торце обмотки (б), карта распределения температуры в МЭС (в).

## 5. Оптимизация электронно-оптической системы

Данная конфигурация магнитной системы позволила разместить в ней электронно-оптическую систему гиротрона с учетом габаритов корпуса, имеющих систему жидкостного охлаждения. Схема электродов и карта потенциалов приведена на рис. 5.



**Рисунок 5.** Цветовая карта распределения потенциалов в ЭОС гиротрона.

Оптимизация формы электродов была проведена в программе Angel. В результате удалось добиться параметров ВЭП, приемлемых для эффективной генерации. Параметры электронного потока сведены в таблицу 1. Вид электронных траекторий показан на рис. 6, при этом максимально возможная плотность мощности на коллекторе (в отсутствии генерации) составила  $500 \text{ Вт/см}^2$ .

Таблица 1. Параметры электронно-оптической системы

Ток пучка, А	Ускоряющее напряжение, кВ	Питч-фактор	Разброс поперечных скоростей, %	Радиус ведущих центров в резонаторе, мм	Плотность мощности на коллекторе, Вт/см <sup>2</sup>
0.2	5	1.5	10	2.9	500

Рисунок 6. Вид электронных траекторий и профиль электродов гиротрона.

## 6. Заключение

Выполнен анализ компактного гиротронного комплекса, работающего при низком ускоряющем напряжении  $U_a=5$  кВ. Для данного гиротрона разработана энергоэффективная магнито-экранированная система, обеспечивающая индукцию магнитного поля более 1 Тл на однородном участке длиной 67 мм и потребляющая при этом около 5 кВт. В соответствии с особенностями профиля магнитного поля МЭС (резкое нарастание в катодной области и убывание в зоне коллектора) оптимизирована электронно-оптическая система, обеспечивающая при рабочем токе 0.2 А питч-фактор пучка  $g=1.5$  и разброс поперечных скоростей  $v_{\perp}=10\%$ .

Проведенный расчет электронно-волнового взаимодействия показывает возможность обеспечения КПД генерации 23%, что для режима работы 23 кВ / 0.2 А соответствует мощности 230 Вт. Характер использования данного комплекса предполагает максимальное удобство и простоту использования в лабораторных условиях, поэтому в рамках решения тепловой задачи была разработана система охлаждения, не требующая подключения к термостабилизированному контуру. Относительная простота источников питания, компактность и низкое интегральное энергопотребление комплекса (около 6 кВт) позволяет позиционировать его как широкодоступный инструмент для различных научных направлений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 21-58-53051).

### Список литературы

1. A. G. Litvak, G. G. Denisov and M. Y. Glyavin. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends, *IEEE Journal of Microwaves*, **1**, 260-268 (2021), <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>.
2. Y.V.Bykov, A.G.Eremeev, M.Y.Glyavin et al. Millimeter-Wave Gyrotron Research System. I. Description of the Facility. *Radiophys Quantum Electron.* **61**, 752–762 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09933-6>
3. Goldenberg, A.L., Glyavin, M.Y., Zavolsky, N.A. et al. Technological gyrotron with low accelerating voltage. *Radiophys Quantum Electron* **48**, 741–747 (2005). <https://doi.org/10.1007/s11141-006-0003-7>
4. Proyavin, M.D., Manuilov, V.N., Gachev, I.G. et al. A Magneto-Armored Warm-Solenoid Based System for K-Band Gyrodevices. *Instrum Exp Tech* **63**, 97–100 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0020441220010078>.
5. O. P. Plankin, E. S. Semenov, ANGEL 2DS Program Package for Gyrotron Gun Modeling: User's Guide. Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2011.
6. Proyavin, M.D., Glyavin, M.Y., Zaval'sky, N.A. et al. Development of a High-Power Continuous-Wave Gyrotron for High-Efficiency Technological K-Band Microwave Complexes. *Radiophys Quantum Electron* **62**, 506–512 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11141-020-09996-w>
7. COMSOL Multiphysics description. <https://www.comsol.ru/> Available April 15, 2022