

## Гиротронные комплексы нового поколения для приложений низкотемпературной физики плазмы

М.Д. Проявин<sup>1</sup>, М.В. Каменский<sup>1</sup>, М.В. Морозкин<sup>1</sup>, А.А. Орловский<sup>1,3</sup>, Д.И. Соболев<sup>1</sup>,  
Е.А. Солуянова<sup>1,2</sup>, Е.М. Тай<sup>1,2</sup>, В.В.Холопцев<sup>1</sup>, И.А. Варыгин<sup>1</sup>, А.Ю. Новиков<sup>1</sup>, М.М. Троицкий<sup>1</sup>,  
М.Ю. Глявин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

<sup>2</sup>АО НПП «ГИКОМ»

<sup>3</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация:** Микроволновые комплексы в настоящее время активно используются для электронного нагрева низкотемпературной плазмы в различных установках. Наиболее яркими примерами такого применения являются компактные источники сильноточных ионных пучков и тяжелых ионов. Области применения таких систем разнообразны: от производства новых элементов до ионной и борно-нейтронно-захватной терапии. Технологии физики низкотемпературной плазмы также включают выращивание алмазных пленок и дисков методом CVD. Существенное развитие данных приложений, главным образом в области параметров плазмы, требует все больших частот и мощностей для ее ЭЦР-нагрева. Поэтому в настоящее время ведется разработка и внедрение нового поколения технологических гиротронных комплексов, обладающих повышенной мощностью и КПД генерации для диапазона частот 14-100 ГГц, некоторые из которых уже успешно функционируют в рамках рассматриваемых приложений. В настоящей работе продемонстрированы улучшенные характеристики гиротронов и их магнитных систем, включая физические принципы их достижения, а также результаты разработки и оптимизации не менее важных подсистем всего комплекса, включая систему управления, контроля и сбора данных, высоковольтные источники питания.

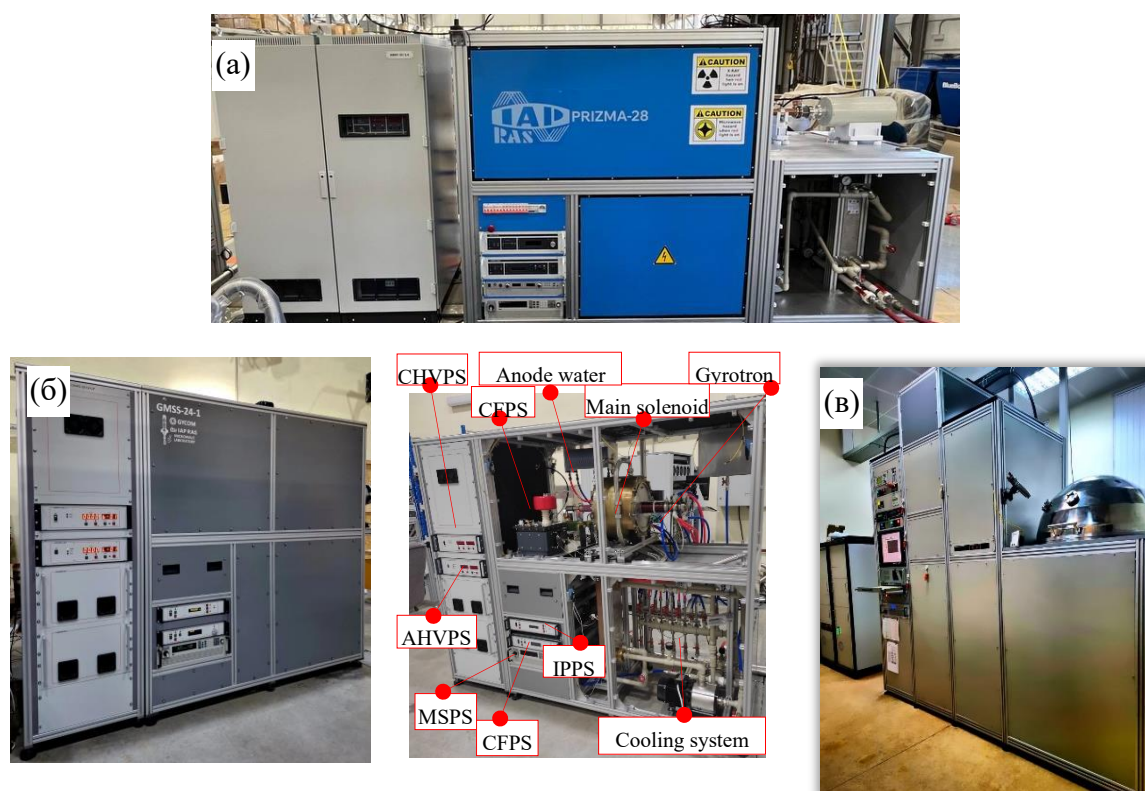
**Ключевые слова:** гиротрон, низкотемпературная плазма, источники многозарядных ионов, CVD алмаз

### 1. Введение

Микроволновые комплексы в настоящее время активно используются для электронно-циклотронного нагрева (ЭЦР) низкотемпературной плазмы в различных установках. Наиболее яркими примерами такого применения являются компактные источники сильноточных ионных пучков и тяжелых ионов. Области применения таких систем разнообразны: от производства новых элементов до ионной и бор-нейтрон-захватной терапии [1,2]. Технологии физики низкотемпературной плазмы также включают выращивание алмазных пленок и дисков методом CVD [3]. Данное приложение особенно становится актуальным в настоящее время, так как в виду существенного роста потребности в гиротронах мегаваттного уровня мощности и линий транспортировки излучения для систем управляемого термоядерного синтеза (УТС), необходимы высокочистые алмазные диски большой (50-80 мм) апертуры. Во всех подобных установках в качестве источника ЭЦР нагрева плазмы все чаще используются комплексы на основе гиротронов. В отличие от других вакуумных микроволновых генераторов, эти устройства способны обеспечивать излучение в больших диапазонах частот (от нескольких ГГц до ТГц-диапазона) и мощностей (от нескольких ватт до мегаватт). Подавляющее число существующих гиротронных комплексов работают на второй гармонике циклотронного резонанса, что позволяет значительно снизить потребление электромагнита, обеспечивающего магнитное поле для электронно-волнового взаимодействия. Развитие таких технологий повышает

требования к частоте, мощности и долговременной (в течение нескольких месяцев) стабильности микроволнового излучения, чего становится все труднее достичь в существующих системах. Кроме того, для промышленного внедрения актуальным становится вопрос цены такого уникального оборудования, значительную часть которой составляет стоимость высоковольтных источников питания. За счет использования более высокоэффективных гиротронов она может быть кратно снижена.

Поэтому в настоящее время в ИПФ РАН совместно с АО НПП ГИКОМ ведется разработка нового поколения технологических гиротронных комплексов [4] с повышенными характеристиками по мощности и КПД генерации, работающих в частотном диапазоне 14-100 ГГц, некоторые из которых уже успешно внедрены в технологические процессы (рис. 1).



**Рисунок 1.** Пример поставки гиротронного комплекса 28 ГГц / 10 кВт для ионного источника в г. Дубна (а), гиротронный комплекс 24 ГГц / 10 кВт и его основные модули для ионного источника Secral 3, г. Ланьчжоу, Китай. Гиротронный комплекс 28 ГГц / 25 кВт для установки CVD, г. Нижний Новгород ИПФ РАН (в).

## 2. Гиротрон нового поколения на базе магнито-экранированной системы

Ключевым узлом СВЧ- комплекса является генератор, работающий на основной гармонике циклотронного резонанса. По сравнению с предыдущими вариантами технологических гиротронов, в данном приборе электронно-волновое взаимодействие происходит на первой гармонике гирочастоты. Это позволяет значительно поднять эффективность и устойчивость одномодовой генерации. В гиротронах, работающих на второй гармонике циклотронного резонанса, при перестройке режимов, необходимых для проведения технологических процессов, зачастую приходится сталкиваться с возбуждением более устойчивого паразитного колебания на основном циклотронном

резонансе, соответственно, с вдвое меньшей частотой. Такой режим неприемлем для работы системы в составе технологических процессов. В то же время, типичный КПД генерации таких гиротронов обычно не превышает 20-25%, в то время как гиротроны на основном циклотронном резонансе при должной оптимизации могут обеспечивать эффективность более 50%. Помимо выигрыша в мощности потребления комплекса, гиротроны нового поколения могут использовать существенно менее мощные высоковольтные источники питания, стоимость которых может составлять 30% от общей цены всей системы ЭЦР-нагрева. В то же время, работа на существенно меньшем токе электронного пучка позволяет продлить время жизни катода – основного элемента, ограничивающего срок службы генератора.

Однако, для обеспечения работы на основном циклотронном резонансе требуется вдвое большее магнитное поле в области электронно-волнового взаимодействия, и, следовательно, в 4 раза большая мощность энергопотребления. В этой связи, мощность магнитной системы возрастает с 10 кВт до 40 кВт, при том, что типичные мощности генерации находятся в диапазоне 0.2 – 10 кВт. Соответственно, для решения этой проблемы была разработана специальная магнитная система, концентрирующая магнитный поток в области резонатора гиротрона (максимального поля). В процессе оптимизации ферромагнитных экранов удалось сохранить энергопотребление магнитной системы на примерно том же уровне (около 12 кВт).

Использование магнитомягких элементов создает неадиабатическое магнитное поле в области формирования и осаждения электронного потока в гиротроне, что значительно усложняет использование надежных и проверенных временем магнетронно-инжекторных пушек (МИП) и условий корректного осаждения отработанного электронного пучка на коллектор гиротрона. В связи с этим, для формирования оптимального с точки зрения электронно-волнового взаимодействия. Винтового электронного пучка (ВЭП), в первую очередь необходимо было оптимизировать МИП для работы в таких магнитных полях. Для уменьшения коэффициента неадиабатичности магнитного поля было осуществлено профилирование ферромагнитных экранов вблизи катода и коллектора гиротрона. Затем была проведена оптимизация электродов электронно-оптической системы (ЭОС). В результате цикла расчетов для режима работы с ускоряющим напряжением  $U_0 = 23$  кВ, и тока пучка  $I_b = 2.4$  А был получен пучок с малым разбросом поперечных скоростей  $\delta v_{\perp} = 7\%$  и питч-фактором  $g = 2$ . Для данного режима был выбран триодный тип МИП с напряжением на аноде  $U_a = -10$  кВ и добавлена экранированная катодная катушка с током  $I_{cc} = 5$  А. Для обеспечения требуемого распределения (не более 500 Вт/см<sup>2</sup>) плотности мощности, осаждаемой на коллектор гиротрона, была оптимизирована специальная коллекторная катушка, позволяющая существенно увеличить след пучка на коллекторе. В то же время, в оптимизацию ЭОС входила задача обеспечить определенное положение ВЭП в резонаторе гиротрона  $R_c = 3$  мм, необходимое для возбуждения расчетной рабочей моды. Данный параметр варьировался для разных режимов генерации в диапазоне частот 14-100 ГГц, что в некоторых случаях требовало изменения электродов гиротрона и существенного смещения относительно центра магнитной системы. Таким образом, в рассматриваемом частотном диапазоне были сформированы несколько типов гиротронов (рис. 2).



**Рисунок 2.** Внешний вид двух типов гиротронов нового поколения с КПД генерации до 55%: (а) мощность генерации до 30 кВт, режимы по частоте излучения 28, 35, 45, 95 ГГц, апертура выходного волновода 66 мм, (б) мощность генерации до 15 кВт, режимы по частоте излучения 24, 28 ГГц, апертура выходного волновода 32.6 мм, (в) мощность генерации до 8 кВт, режимы по частоте излучения 14, 18 ГГц, апертура выходного волновода 32.6 мм.

### 3. Высоковольтные источники питания и система управления

Как отмечалось ранее, гиротрон на базе магнито-экранированной системы (МЭС), обладает существенно большим КПД генерации, что позволяет как достигать больших мощностей генерации, так и снизить мощность источников питания. Для приложений в области CVD производства алмазов для мегаваттных гиротронов УТС требуется непрерывная мощность 20-30 кВт, что в отличии от гиротрона на второй гармонике циклотронного резонанса с мощностью до 10 кВт, позволит исключить из плазмы Аргон, необходимый для ее поджига на меньшем уровне мощности. Данный газ существенно портит параметры получаемых алмазных дисков, а переход на работу с магнетрона с частотой 2.45 ГГц на гиротрон с частотой 28 ГГц позволит в разы ускорить время роста данных кристаллов. Для данного типа ЭЦР-комплексов используются высоковольтные источники питания мощностью 60 кВт. В то же время, для приложений, связанных с компактными источниками ионов, требуются мощности генерации до 10 кВт, что позволяет снизить мощность высоковольтных источников питания вдвое – до 30 кВт.

Комплект высоковольтных источников питания для технологических гиротронных установок, производимый в ИПФ РАН, состоит из источников электроразрядного насоса, накала катода, анодного и катодного источника, а также блока коммутации и управления (см. рис. 1б), основные параметры приведены в таблице 1.

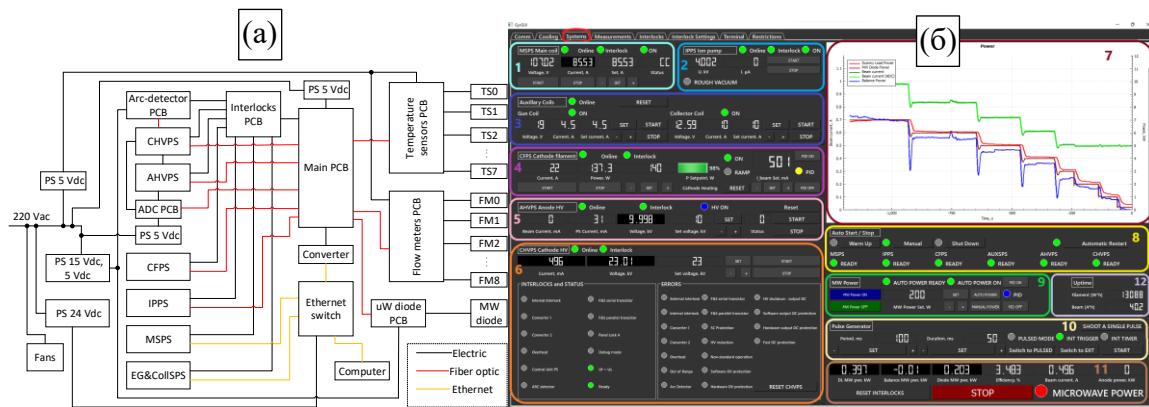
**Таблица 1.** Параметры высоковольтных источников питания

|  |   |
|--|---|
| Источник питания электроразрядного насоса IPPS               | до 3 мА, 4 кВ                                   |
| Источник питания накала гиротрона CFPS                       | до 30 А, 10 В, развязка до 30 кВ                |
| Высоковольтный источник питания катода гиротрона CHVPS       | до 1,2 А, 25 кВ, режим импульсный и непрерывный |
| Высоковольтный источник электропитания анода гиротрона AHVPS | до 100 мА, 12 кВ                                |

Связь источников питания с системой управления комплекса (СУ) осуществляется по последовательному интерфейсу UART через дуплексную многомодовую ВОЛС стандарта 62,5/125 мкм. Тип соединителя – ST. Параметры UART – 115200 8N1 (скорость передачи данных 115200 bps, 8 бит, без контроля четности, 1 стоп-бит). Протокол связи – Modbus RTU. Система защит имеет как быстрые (микросекунды) каналы (без обработки главным процессором СУ), так и относительно медленные

(десятки миллисекунд), основанные на логике, установленной в СУ.

Система управления гиротронным комплексом, также разработанная в ИПФ РАН, состоит из набора плат контроля и сбора данных, обработки и блокировок (рис. 3а). Каждый из плат СУ представляет собой отдельную плату на базе 8-битных микроконтроллеров семейства AVR, снабженную необходимыми защитами от наведённого электрического потенциала и оснащённую несколькими интерфейсами ввода-вывода, различными датчиками и т.д. Модули, непосредственно взаимодействующие с высоковольтным оборудованием, а также с датчиками, на которые может быть наведён высокий потенциал, отделены от остальной системы оптическими линиями передачи данных, что увеличивает общую надёжность системы. Модульный подход также облегчает дальнейшую модернизацию СУ или её изменение при замене источников питания или других компонентов гиротронного комплекса.



**Рисунок 3.** (а) – схема подключения системы управления к оборудованию GMSS: АЦП – аналого–цифровой преобразователь, FM - расходомер, PCB – печатная плата, PS – источник питания, TS – датчик температуры, (б) – основная вкладка графического интерфейса для управления гиротронным комплексом

Графический интерфейс пользователя (GUI) системы управления комплексом представляет собой отдельную программу, которая позволяет пользователю видеть параметры настройки гиротрона в режиме реального времени и отправлять команды в систему управления, используя удобный графический интерфейс с вкладками, различными индикаторами, графиками, вводом данных элементы и кнопки управления (рис. 3б).

#### 4. Заключение

Разработанные гиротронные комплексы нового поколения полностью отвечают современным запросам в области ионных источников и установок CVD, а также имеют довольно большой запас по параметрам для дальнейшего применения в развивающихся приложениях. Производство данных комплексов практически полностью локализовано на территории РФ, что делает их надежным инструментом, например, для получения уникальных алмазных дисков для развивающейся термоядерной программы ТРТ. Законченность исполнения и оптимизация процесса пользования комплексом существенно упрощает процесс внедрения и эксплуатации в составе различных технологических процессах.

Исследование выполнено в рамках проекта ИПФ РАН «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» FFUF-2022–0007

#### Список литературы

1. Lu, L. et al., High power test of an injector linac for heavy ion cancer therapy facilities. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 18(11). doi:10.1103/physrevstab.18.111002.

2. V. A. Skalyga et al., Gasdynamic electron cyclotron ion sources: Basic physics, applications, and diagnostic techniques. *Rev. Sci. Instrum.* 1 March 2022; 93 (3): 033502. <https://doi.org/10.1063/5.0075486>
3. A. L. Vikharev et al., "Diamond films grown by millimeter wave plasma-assisted CVD reactor", *Diamond Rel. Mater.*, vol. 15, no. 4, pp. 502-507, Apr. 2006
4. M. D. Proyavin et al., "Results of the Study of a New Generation Technological Gyrotron System With High Power and Efficiency," *Electron Device Letters*, vol. 44, no.1,pp.148-151,Jan.2023,doi:10.1109/LED.2022.3222169