

Разработка мощных гиротронов для сферических токамаков

И.В. Бандуркин¹, И.В. Зотова², В.Н. Мануилов^{1,2}, М.Д. Проявин¹, Е.С. Семенов¹, Е.М. Тай³, А.Э. Федотов¹

¹Институт прикладной физики РАН

²Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

³ЗАО НПП «ГИКОМ»

Аннотация: в данной работе рассмотрены варианты будущих непрерывных гиротронных комплексов мегаваттного уровня мощности, предназначенных для нагрева и удержания плазмы в сферических токамаках. Приведены расчеты электронно-оптической и электродинамической систем для различных вариантов исполнения СВЧ-комплексов. Исследованы возможности использования в качестве системы формирования магнитного поля на базе «теплых» соленоидов с ферромагнитными экранами. Рассмотрены проекты гиротронов, способных работать на двух частотах что позволяет эффективно нагревать различные области плазменного шнура.

Ключевые слова: гиротрон, магнетронно-инжекционная электронная пушка, электронно-циклотронный нагрев плазмы, термоядерный синтез, сферический токамак

1. Введение

Ядерный синтез десятилетиями изучается как способ удовлетворить растущий спрос на электроэнергию без выброса углерода. В настоящее время токамаки являются наиболее развитыми термоядерными реакторами, которые очень близки к демонстрации положительного выхода энергии на установке ИТЭР. Однако сложность технической конструкции, размер и стоимость обычных токамаков огромны, поэтому представляют интерес альтернативные конфигурации термоядерных реакторов. Сферические токамаки считаются перспективными термоядерными реакторами, поскольку они имеют больший объем плазмы по сравнению с токамаками традиционной геометрии с такими же внешними размерами. Принципиальное отличие различных концепций токамаков заключается в величине аспектного отношения A , которое представляет собой соотношение большого и малого радиусов тора. Для традиционных проектов, включая ITER и DEMO $A > 10$, в то время как для сферических токамаков (MAST, ST40) $A \sim 1$. При фиксированной частоте электронно-циклотронный резонансный (ЭЦР) нагрев плазмы может происходить только в некоторой области, где выполняется условие электронно-циклотронного резонанса. Различная геометрия реактора приводит к разнице в режимах ЭЦР-нагрева. Для термоядерных установок с высоким A тороидальное магнитное поле слабо меняется во всем объеме плазмы. Напротив, для сферических устройств с $A \sim 1$ магнитное поле может изменяться в два и более раза по радиусу. Таким образом, в сферических токамаках существует возможность варьировать зону нагрева изменяя частоту СВЧ-излучения. Изучение зависимости режима нагрева плазмы при изменении положения области ЭЦР-нагрева входит в программу исследований для сферических токамаков. Для этого представляет интерес гиротронная система, способная обеспечивать непрерывную мегаваттную мощность на двух разных частотах. Расчетное магнитное поле в модернизированной версии реактора составляет от 0,7 до 1,5 Тл, поэтому микроволновые частоты, необходимые для ЭЦР-нагрева, лежат в К-диапазоне. В рамках перспективного развития сферических токамаков, рассматривается переход с ныне используемых медных магнитов на ВТСП магниты [1]. Увеличение магнитного поля позволит

сделать токамак более компактным, при этом высокотемпературные сверхпроводники можно будет использовать при азотных температурах, в отличие от НТСП. Имеющиеся представления о характеристиках будущих мегаваттных СВЧ-комплексов для ЭЦР-нагрева в сферических токамаках легли в основу разработки гиротронов с частотами излучения 19, 28 и 38 ГГц, рассмотренных в данной работе.

Существует несколько способов создания гиротронной системы, обеспечивающей СВЧ-излучение на двух разных частотах. Самым простым, но дорогим способом, очевидно, является создание двух отдельных источников. Более дешевый, но и более сложный подход - разработать одно устройство, которое может работать на любой из двух частот. Рассматриваются два подхода к решению этой проблемы. В первом варианте гиротрон будет работать на основном циклотронном резонансе для низкой частоты и на второй циклотронной гармонике для высокой частоты, предполагая, что значения рабочего магнитного поля примерно одинаковы для обоих режимов. В этом случае основной проблемой является реализация устойчивого одномодового возбуждения рабочего типа колебаний на второй гармонике в условиях конкуренции мод [2]. Другой способ достижения генерации на двух сильно разнесенных частотах в гиротроне мегаваттного уровня мощности, рассмотренный в данной работе, это генерация в режиме основного циклотронного резонанса на обеих частотах, что требует значительного изменения рабочего магнитного поля гиротрона [3]. Такой подход решает проблему конкуренции мод, но возникает проблема формирования винтового электронного пучка при двукратном изменении магнитного поля. Принципиальная возможность ступенчатой перестройки частоты на октаву была продемонстрирована в гиротронах малой и средней мощности (см., например, [4]). В работе [5] были представлены результаты испытаний гиротрона 28/35 ГГц с мощностью 0.5-1 МВт при длительности импульса 1-2 секунды. В настоящей работе исследуется возможность создания квазинепрерывного двухчастотного гиротрона мегаваттного уровня мощности.

2. Проект двухчастотного непрерывного гиротрона мегаваттного уровня мощности 19/38 ГГц

Хотя точные частоты генерации пока не определены проектировщиками сферических токамаков, представляется удобным выбирать соотношение частот очень близким к 2, что позволяет использовать простейшее однодисковое вакуумное окно для безотражательного вывода мощности на обеих частотах. Коэффициенты возбуждения обеих рабочих мод должны быть близки к максимальным при фиксированном радиусе электронного пучка. Исходя из геометрии современных магнитных систем радиус ведущих центров электронного потока должен составлять около 10 мм, так как только в этом случае максимальный радиус элементов конструкции катодно-анодного узла будет соответствовать проходному отверстию соленоида. В результате анализа спектра мод круглого волновода в качестве рабочих были выбраны моды $TE_{2,3}$ и $TE_{7,4}$. При диаметре резонатора 50 мм частоты этих мод составляют 19,13 ГГц и 38,13 ГГц соответственно. Эти моды не имеют близко расположенных конкурентов и легко обеспечить их селективное одномодовое возбуждение. Оптимальный радиус ведущих центров электронных орбит для обеих мод одинаков и близок к 10 мм, но оптимальная длина резонатора для этих мод существенно различается. Например, для электронного пучка с напряжением 80 кВ и током 30 А на частоте 38 ГГц оптимальная длина составляет 45 мм, а на частоте 19 ГГц оптимальная длина составляет 65 мм. В качестве компромиссного решения выбрана длина резонатора 60 мм, обеспечивающая выходную мощность более 1 МВт для обеих частот. Общие омические потери на частоте 38 ГГц составляют около 50 кВт, поэтому пиковая тепловая нагрузка резонатора составляет около 1 кВт/см², а на

частоте 19 ГГц примерно в два раза меньше. Омическую нагрузку можно снизить до 30 кВт, уменьшив длину резонатора до 50 мм; однако для достижения выходной мощности 1 МВт на частоте 19 ГГц в этом случае потребуются увеличить электронный ток до 40 А что усложняет конструкцию электронной пушки.

Для формирования винтового электронного пучка (ВЭП) хорошего качества в режимах с двукратной разницей рабочего магнитного поля была предложена триодная конфигурация магнетронно-инжекторной пушки (МИП) с радиусом катода 39 мм и степенью магнитной компрессии 16. Рабочий ток равный 30 А при разумной ширине эмиттера, определяющей позиционный разброс электронов в резонаторе на уровне около $\lambda/5$, достигается при эмиссии около 2 А/см². В режиме сильного магнитного поля МИП работает в диодном режиме с напряжением 80 кВ на первом аноде, в режиме слабого поля – 36 кВ. В слабом поле низкое напряжение на первом аноде приводит к значительной неоднородности электрического поля на эмиттере из-за пространственного заряда пучка. При определении профиля электродов ЭОС для оптимизации доли вращательной энергии электронов и разброса их скоростей добавлена катодная катушка и искривлена форма катода у краев эмиттера. Для разработанной геометрии пушки численное моделирование предсказывает формирование ламинарного пучка с параметрами, достаточными для достижения высокого КПД – питч-фактор (отношение вращательной скорости электронов к скорости их поступательного движения) ~ 1.3, разброс вращательных скоростей на уровне 0.1-0.9 около 10%.

3. Проект двухчастотного непрерывного гиротрона мегаваттного уровня мощности 29/37 ГГц

Можно рассмотреть альтернативный вариант магнитной системы, в которой при сильном изменении магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия магнитное поле в области катода и коллектора меняется слабо. Это позволяет обеспечить требуемые условия формирования и осаждения электронного пучка в разных режимах используя дополнительные катушки малой мощности в соответствующих областях. Перспективными для этой цели кажутся системы на базе теплых соленоидов с ферромагнитными экранами. Магнитомягкий материал выполняет двойную функцию – с одной стороны он дает возможность резко сократить энергопотребление основного соленоида (и, следовательно, упростить систему охлаждения), с другой – играет роль элемента, ослабляющего поле рассеяния. В качестве прототипа подобной системы был рассчитан вариант мегаваттного гиротрона с частотами излучения 29/37 ГГц на базе магнито-экранированной системы (МЭС).

Имея возможность сильно менять магнитное поле в резонаторе без существенного изменения поля на катоде, критичность к выбору моду с одинаковым радиусом встречи уменьшается, так как катодной катушкой можно регулировать радиус ведущих центров в области электронно-волнового взаимодействия в достаточно широких пределах. Это позволило в качестве рабочих типов колебаний рассматривать моды TE_{62} и TE_{42} с соответствующими частотами 37 ГГц и 29 ГГц в резонаторе радиусом 15 мм. Оптимальные радиусы пучков в резонаторе составили 8.2 мм и 6.8 мм, соответственно. Спектр мод в окрестности рабочих и факторы возбуждения демонстрируют потенциальную возможность осуществления устойчивой одномодовой генерации. Выбор длины однородного участка резонатора, как и в прошлом проекте, выбирался компромиссным для обоих типов колебаний. В процессе расчетов он составил 52 мм. Оптимизация параметров электронно-волнового взаимодействия позволила рассчитывать на генерацию излучения на уровне 850 кВт в обоих режимах, при КПД около 35% без применения рекуперации энергии (см. рис. 1).

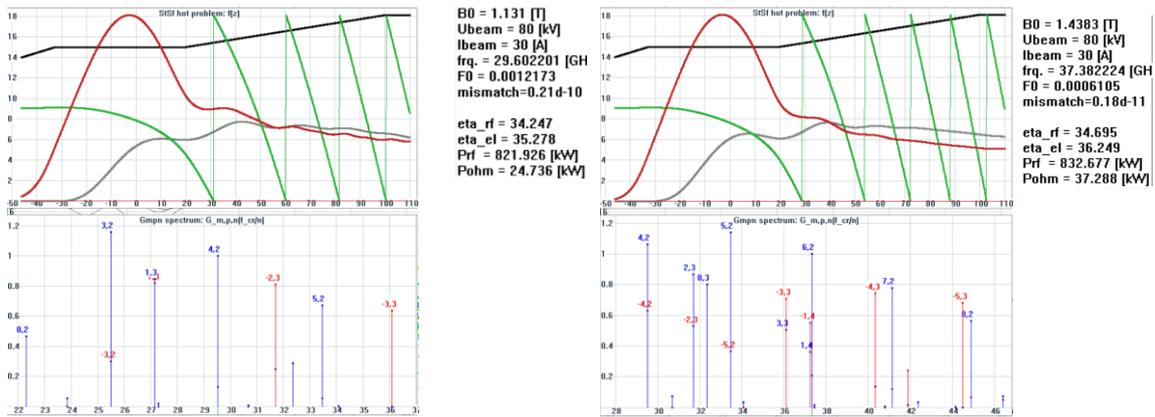


Рисунок 1. Спектр мод (снизу) в окрестности рабочих типов колебаний TE_{42} (слева) и TE_{62} (справа) и результаты расчета КПД их генерации (вверху).

Задача оптимизации электронно-оптической системы в этом случае тесно связана с разработкой МЭС, так как оптимизация формы ферромагнитных экранов сильно меняет топологию силовых линий магнитного поля и, соответственно, винтового электронного пучка. Для достижения приемлемого уровня энергопотребления основного соленоида с диаметром проходного отверстия 120 мм ферромагнитные элементы и дополнительная катушка в резонаторной области была интегрированы в корпус гиротрона. Поскольку осаждение электронного потока требует пространственно-развитого коллектора, диаметр которого значительно превосходит диаметр катодно-анодного узла, естественным представляется установка лампы в магнит катодным концом, что и определяет диаметр проходного отверстия магнитной системы. По итогам итерационного процесса оптимизации была получена конфигурация магнитной системы и электродов МИП, позволяющая реализовать винтовой электронный пучок (см. рис. 2) с требуемыми параметрами: $g=1.3$, $\delta v_{\perp}=20\%$.

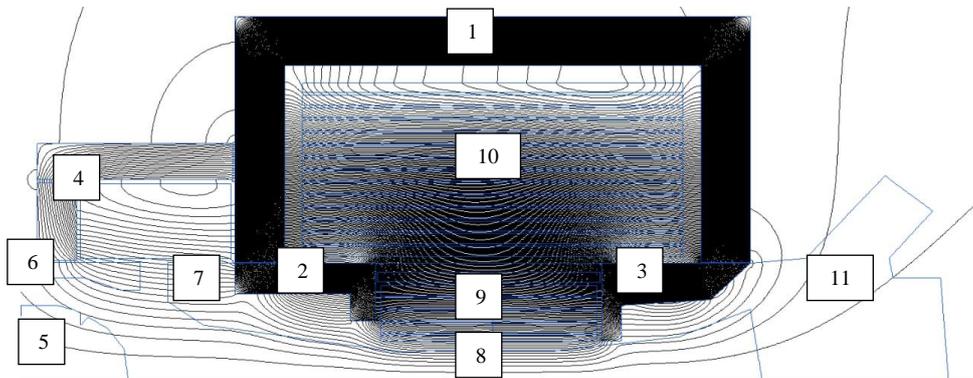


Рисунок 2. Схема магнитной системы и гиротрона. 1- ферромагнитный корпус МЭС, 2 и 3 – ферромагнитные вставки в корпусе гиротрона, 4 – катодная катушка, 5 – катод, 6 – модулирующий анод, 7 – основной анод, 8 – область резонатора, 9 – резонаторная катушка, намотанная на гиротрон, 10 – намотка основной магнитной системы, 11 – область коллектора и вывода излучения.

Помимо достижения требуемых параметров пучка в резонаторе (питч-фактор, разброс скоростей) удалось достигнуть приемлемых значений плотности мощности осаждаемого электронного пучка на коллекторе. Данная задача является очень важной для гиротронов мегаваттного уровня мощности и оптимизируется из расчета отсутствия генерации (худший сценарий – вся запасенная энергия находится в электронном пучке). В то же время, магнитное поле МЭС в данной области

характеризуется сильной неадиабатичностью, что приводит к сложностям оптимизации осаждения ВЭП [6]. Для обеспечения длинного следа пучка на стенках коллектора был оптимизирован ферромагнитный экран и предложена нестандартная форма коллектора, показанная на рис. 2. В предложенном варианте площадь коллектора была увеличена за счет использования двух стенок (в трехмерном варианте они представляют из себя два усеченных конуса). В результате расчетов удалось добиться распределения плотности мощности в пределах 1 кВт/см^2 , однако результаты сильно зависят от параметров пучка (разброса скоростей).



Рисунок 3. Топология винтового электронного пучка в оптимизированной электронно-оптической системе гиротрона в магнитном поле МЭС.

Такая критичность может привести к смещению пучка в область одной из стенок и нарушить допустимые значения. Поэтому в будущих расчетах необходимо оптимизировать коллектора с учетом двукратного уменьшения допустимой плотности мощности. Это, например, может быть легко осуществлено за счет удлинения стенки, так как текущие габариты (даже поперечные) соответствуют поперечным размерам коллекторов существующих гиротронов, где осаждения пучка идет практически вдоль оси системы. В то же время, увеличение поперечных размеров не противоречит конструктивным особенностям, а резкий вывод электронного потока из области распространения волнового пучка может позволить осуществить размещения зеркал и, соответственно, корректный вывод энергии из вакуумного объема.

3. Заключение

Данную работу, безусловно, нельзя рассматривать как готовый к реализации проект, на этом этапе мы сконцентрировались на анализе различных подходов, что позволило выявить целый ряд вопросов, требующих дополнительного исследования. Одним из наиболее проблематичных ситуаций является процесс вывода СВЧ излучения из вакуумного объема, размещение квазиоптического преобразователя в области оседания электронного пучка мегаваттного уровня мощности. Рассмотренные варианты возбуждения существенно разных по частоте рабочих типов колебаний демонстрируют возможность реализации в одном СВЧ-источнике потребностей сферических токамаков, в том числе и их будущих версий на базе высокотемпературных сверхпроводящих магнитов.

Исследование выполнено за счет **гранта РФФИ (проект № 19-32-90102)**.

Список литературы

1. Windridge Melanie 2019 Smaller and quicker with spherical tokamaks and high-temperature superconductors *Phil. Trans. R. Soc. A*. 3772017043820170438 <http://doi.org/10.1098/rsta.2017.0438>
2. G.G. Denisov et al., "Concept of gyrotron with MW power level at first and second cyclotron harmonics for plasma heating in spherical tokamaks," *Radiophys. Quantum Electronics*, vol. 63, no. 5, October 2020 (accepted).
3. G. S. Baghel and M.V. Kartikeyan, "RF Behavior of a 42/84 GHz, 0.5 MW, dual frequency Gyrotron," in *Proc. of IEEE Conf.*, April 2015.

4. W. Fu, X. Guan, C. Chen, X. Li, X. Yuan, and Y. Yan, "Design and experiment of a 220/420-GHz gyrotron for nondestructive evaluation," *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. 61, pp. 2531-2537, July 2014.
5. T. Kariya, T. Imai, R. Minami, K. Tsumura, Y. Ebashi, H. Idei, K. Hanada, M. Ono, K. Komurasaki, T. Numakura, Y. Endo, and Y. Nakashima, "Development of 28/35 GHz dual-frequency gyrotron for ECH study" , *AIP Conference Proceedings* 1771, 030020 (2016) <https://doi.org/10.1063/1.4964176>.
6. Morozkin, M.V., Proyavin, M.D., Manuilov, V.N. et al. Optimization of Collector Systems of Technological Gyrotrons with Shielded Magnetic Systems. *Radiophys Quantum El* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10066-y>.