

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.8>

УДК: 621.385.69

МНОГОЛУЧЕВЫЕ ГИРОТРОНЫ С ВЛОЖЕННЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

М.Ю. Глявин¹, А.С. Зуев¹, В.Н. Мануилов^{1,2}, В.А. Скалыга¹

¹ ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46

² ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603022, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23

Статья поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Аннотация. Для некоторых приложений требуются мощные многочастотные источники сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн. В частности, дополнительный стабилизирующий сигнал требуется в ЭЦР источниках многозарядных ионов для подавления циклотронных плазменных неустойчивостей. В работе предлагается концепт двухлучевого технологического гиротрона, обеспечивающего генерацию излучения одновременно на двух частотах: на частоте 28 ГГц с мощностью до 10 кВт для ЭЦР нагрева плазмы и на частоте 14.4 ГГц с мощностью до 6 кВт для стабилизации плазмы. Возможность излучения на двух частотах реализуется за счет применения оригинальной электродинамической системы, представляющей собой соосно вложенные резонаторы. Такой подход позволяет сформировать сигнал на близких частотах при работе на одной циклотронной гармонике и/или на кратных частотах при работе на разных гармониках. Возможны разные комбинации электронно-оптических и электродинамических подсистем гиротрона в сочетании с традиционными или сложными магнитными системами. Обсуждаются варианты конструкции нового типа гиротрона и концепции двухлучевой электронно-оптической системы, которые могут быть использованы для формирования винтовых электронных пучков в такой системе.

Одной из перспективных концепций является система со встречными электронными пучками, в которой первый пучок формируется стандартной магнетронно-инжекторной пушкой (МИП), второй – инвертированной МИП. Ещё одной перспективной модификацией является использование нескольких пучков в одном или каждом резонаторе для многочастотной генерации или селекции рабочего типа колебаний. В некоторых рассмотренных вариантах электронно-оптической системы возможен отдельный подогрев каждого эмиттера, что делает возможным независимое включение любого генератора или нескольких одновременно. Кроме того, в большинстве случаев, регулируя напряжения на электродах, можно дополнительно управлять параметрами электронных пучков. Ещё одно интересное решение – введение вспомогательного соленоида в основную магнитную систему, что позволит изменить соотношение частот выходного сигнала. Для реализации рассмотренных концепций гиротронов требуются магнитные системы с большим проходным отверстием.

Ключевые слова: гиротрон, высокая циклотронная гармоника, магнетронно-инжекторная пушка, электронные пучки.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке по теме FFUF-2022-0007.

Автор для переписки: Зуев Андрей Сергеевич, andrey.zuev@ipfran.ru

Введение

Мощные источники излучения миллиметрового диапазона длин волн, обеспечивающие генерацию одновременно на нескольких частотах, перспективны для применения в источниках многозарядных ионов с нагревом плазмы в условиях электронно-циклотронного резонанса (в ЭЦР источниках многозарядных ионов). ЭЦР источники многозарядных ионов применяются для инъекции пучков в ускорители для исследований в области ядерной физики и в широком спектре прикладных задач. Нагрев плазмы одновременно на двух частотах является одним из наиболее эффективных методов улучшения характеристик таких систем [1–4] в плане повышения извлекаемого тока ионов, их среднего заряда, а также временной стабильности пучка. В работах [5, 6] было показано, что введение дополнительного излучения с более низкой частотой позволяет существенно расширить диапазон мощности нагрева, в котором ионный источник работает эффективно. Ограничения по максимальной вводимой в источник мощности излучения определяются развитием циклотронных неустойчивостей в плазме ЭЦР разряда из-за наличия в ней сильно анизотропной высокоэнергичной электронной фракции (50 – 500 кэВ) [7–9]. Данные неустойчивости приводят к снижению времени жизни плазмы и среднего заряда ионов, повышению доли примесей и значительным осцилляциям тока извлекаемого ионного пучка [7, 10]. Ключевой эффект нагрева на двух частотах заключается в подавлении такого типа кинетических неустойчивостей [11].

Общий тренд в развитии ЭЦР ионных источников выражается в повышении частоты и мощности нагрева плазмы [12]. Наиболее современные системы используют излучение с частотами в диапазоне 24–45 ГГц и мощностью до 20 кВт [2–4]. Рост характеристик основного греющего источника приводит к необходимости повышения частоты, а также к введению второго, стабилизирующего, сигнала.

Для ЭЦР источников ионов используются гиротроны [13, 14]. Однако, гиротроны обычно не работают одновременно на двух частотах с

сопоставимыми уровнями мощности. Как правило, электронный пучок эффективно взаимодействует лишь с одной собственной модой резонатора, при этом другие моды обычно подавляются [15, 16]. Тем не менее в ряде случаев в гиротроне возможен режим с одновременным возбуждением нескольких мод [17, 18].

Известным решением задачи реализации одновременной многочастотной генерации в одном гиротроне является введение в систему одного или нескольких дополнительных электронных пучков [19–21]. Таким способом при соответствующем выборе рабочих колебаний и положения пучков можно обеспечить «попарную связь» каждого пучка со своей модой практически исключая межмодовое взаимодействие. Такой подход позволяет получить генерацию излучения одновременно на двух модах, синхронных с разными гармониками гирочастоты [21].

Использование в гиротроне двух или более независимых резонаторов открывает новые возможности для построения многочастотных источников излучения. Примером такого подхода являются многоствольные гиротроны [22, 23]. В таком приборе резонаторный блок гиротрона имеет несколько резонаторов, ствол, расположенных параллельно оси прибора в области однородного участка магнитного поля. В каждый ствол влетает свой приосевой электронный пучок. В многоствольных гиротронах используются тонкие пучки с малым током, что существенно ограничивает уровень выходной мощности. Еще одним недостатком является поперечный (азимутальный) дрейф электронов, влияющий на положение электронного пучка в области взаимодействия и осложняющий реализацию прибора.

В данной работе мы предлагаем новый тип гиротрона с одновременной генерацией излучения на двух частотах с существенной мощностью. Такая возможность достигается за счет оригинальной конструкции электродинамической системы – системы вложенных резонаторов [24]. Предложенный подход позволяет независимо включать любой из генераторов или оба одновременно. В разделе 2 описана концепция предлагаемой

модификации гиротрона. Также обсуждаются примеры реализации электронно-оптической системы и описаны особенности построения резонаторного блока проектируемого гиротрона. Данная концепция исследуется на примере технологического гиротрона с одновременной генерацией излучения на частотах 14.4 ГГц и 28 ГГц. Конфигурация резонаторного блока и результаты численного моделирования электронно-волнового взаимодействия представлены в разделе 3. В разделе 4 обсуждаются другие варианты реализации гиротрона с вложенными резонаторами.

1. Общее описание концепции прибора

Новая модификация гиротрона имеет оригинальный дизайн резонаторного блока, который представляет собой несколько резонаторов, вложенных друг в друга. Подобная конфигурация рассматривалась в [25], где была предложена двухлучевая giro-ЛБВ W-диапазона с каскадом из коаксиального и круглого волноводов. Каждый каскад усилителя имеет сравнительно низкий коэффициент усиления, что позволяет избежать возбуждения паразитных колебаний и получить высокий общий коэффициент усиления. В данной работе рассматривается перспективность такого подхода в гиротронах.

Общий концепт такого гиротрона показан на рисунке 1. Электронно-оптическая система (ЭОС) формирует несколько трубчатых винтовых электронных пучков. В каждый из резонаторов вводится один или несколько пучков для возбуждения одной из собственных мод соответствующего резонатора. Взаимодействие электронных пучков с ВЧ-колебаниями происходит в резонаторах в условиях циклотронного резонанса, когда частота излучения ω близка к циклотронной частоте ω_H или ее гармоникам. Конструкция резонаторного блока напоминает матрешку. В перспективе количество вложенных резонаторов может быть более двух, но на данном этапе ограничимся рассмотрением электродинамической системы, состоящей из двух резонаторов. В этом случае внутренний резонатор представляет собой резонатор круглого сечения, а внешний является коаксиальным. Отработанные электронные пучки

оседают на коллекторную систему с возможностью рекуперации остаточной энергии электронов. Излучение с помощью системы квазиоптических зеркал выводится через один или несколько выходных окон.

Переход от канонической схемы с одним резонатором к гиротрону с вложенными резонаторами значительно увеличивает возможности по построению многочастотных источников излучения с существенным уровнем мощности. В частности, подход позволяет реализовать одновременную генерацию излучения на близких частотах при работе на одной циклотронной гармонике и/или на кратных частотах при работе на разных гармониках гирочастоты.

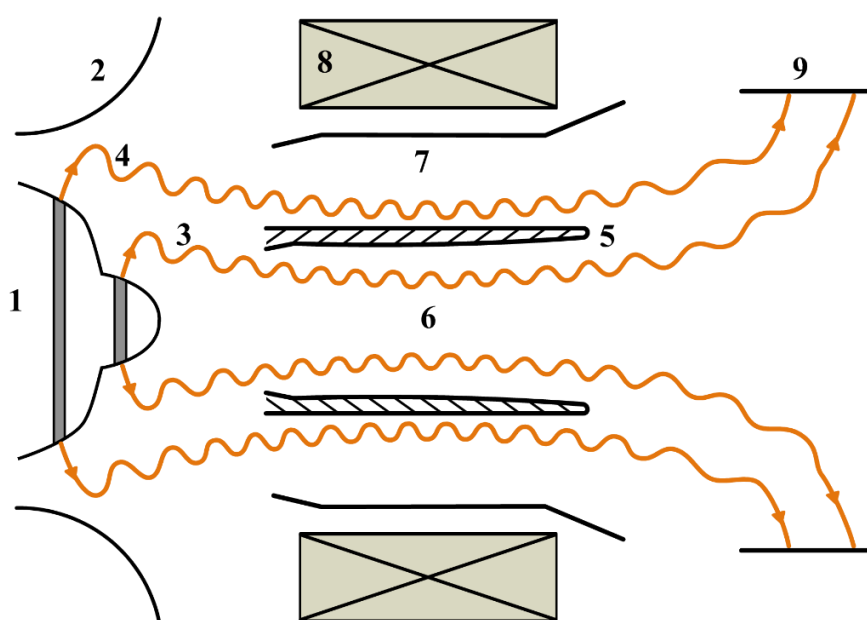


Рис. 1. Общий концепт гиротрона с вложенными резонаторами: 1 – катод, 2 – модулирующий анод, 3 – внутренний эл. пучок, 4 – внешний эл. пучок, 5 – полая коаксиальная вставка, 6 – внутренний резонатор, 7 – внешний резонатор, 8 – магнитная система, 9 – коллектор.

Такой подход, в том числе, в комбинации с другими неканоническими решениями открывает новые перспективы для построения гироприборов с уникальными характеристиками. При этом в предлагаемой конструкции сохраняется азимутальная симметрия, и поэтому система не чувствительна к поперечному дрейфу пучка в отличие от многоствольного гиротрона.

При уходе от канонической схемы к концепции с несколькими резонаторами значительно усложняются практически все подсистемы

гиротрона. В частности, электронно-оптическая и электродинамическая подсистемы могут иметь гораздо бóльшие размеры, что, разумеется, накладывает дополнительные требования на геометрические размеры проходного отверстия используемой магнитной системы. Подсистемы гиротрона могут быть реализованы в самых разных вариантах и в различных сочетаниях. На рисунке 1 показан лишь один из возможных примеров конфигурации такого гиротрона.

2. Концепции электронно-оптической системы

Для формирования электронного пучка могут использоваться один или несколько катодных узлов, которые расположены в зависимости от способов крепления узлов электродинамической системы гиротрона. Предложенная концепция гиротрона может быть реализована с использованием одного из вариантов ЭОС из [26]. На рисунках 2а-г представлены концепции ЭОС для формирования двух винтовых электронных пучков. На рисунках 2а-в показаны варианты для случая крепления вставки со стороны коллектора. Концепция ЭОС из рисунка 2а представляет собой развитие стандартного варианта магнетронно-инжекторной пушки (МИП), обычно используемой в канонических гиротронах. В рамках этой концепции используется общий катод, а кольцевые эмиттеры разнесены для формирования двух винтовых пучков. Альтернативным вариантом является использование двухлучевой обращенной МИП (рис. 2б). Кроме того, возможна их комбинация, например, с формированием внутреннего пучка при помощи обращенной МИП, а внешнего – с помощью стандартной МИП как показано на рисунке 2в. Еще один «гибрид» стандартной и обращенной МИП показан на рисунке 2г. Последний вариант может быть использован в случае крепления внутреннего резонатора со стороны катода.

Перспективный вариант ЭОС со встречными пучками показан на рисунке 3. Внутренний (первый) пучок формируется стандартной МИП с изолированным анодом 2 (левая часть рисунка). Второй пучок формируется инвертированной

МИП с изолированным анодом 4 (правая часть рисунка), расположенным с другой стороны относительно резонатора. При этом анод первой МИП 2 одновременно является коллектором электронного пучка, сформированного второй МИП, а анод второй МИП 4 является коллектором пучка, сформированного первой МИП.

В случае ЭОС, изображенных на рисунках 2г и 3, возможен отдельный подогрев каждого эмиттера, что делает возможным независимое включение любого из генераторов или обоих одновременно. В системах ЭОС типов рис. 2в, 2г и 3 параметры электронных пучков можно дополнительно регулировать, изменяя напряжения на электродах. В системе типа рис. 2в это достигается за счет управления потенциалами на анодах, а в системе типа рис. 2г – за счет изменения потенциалов на катодах. Вблизи областей формирования электронных пучков могут быть расположены одна или несколько корректирующих катушек для дополнительного управления параметрами пучков.

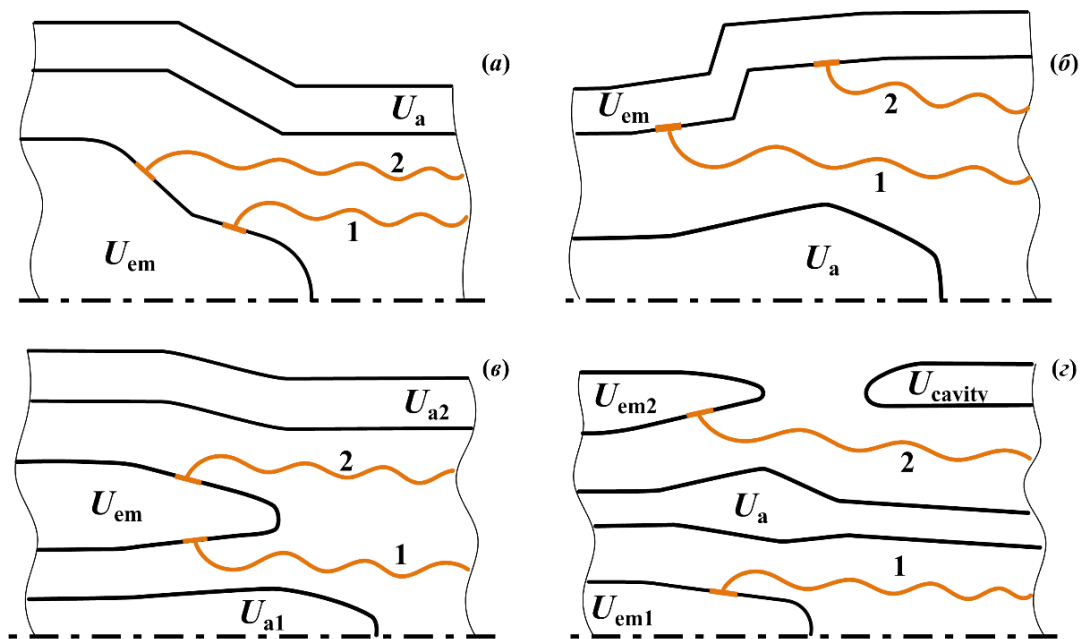


Рис. 2. Перспективные концепции электронно-оптической системы:
1 – внутренний эл. пучок, 2 – внешний эл. пучок.

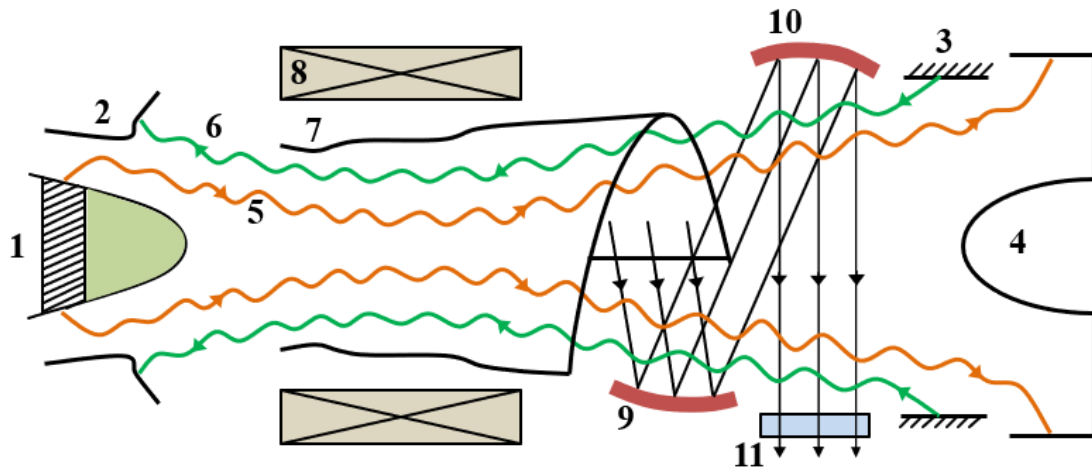


Рис. 3. Общий концепт электронно-оптической системы гиротрона с двумя встречными пучками: 1 – левый катод с потенциалом U_{em1} , 2 – левый анод и коллектор для внешнего пучка 6 с потенциалом U_{a1} , 3 – правый катод с потенциалом U_{em2} , 4 – правый анод и коллектор для внутреннего пучка 5 с потенциалом U_{a2} , 7 – резонатор, 8 – магнитная система, 9 и 10 – квазиоптические зеркала, 11 – выходное окно.

В системе со встречными пучками также может быть реализована система рекуперации остаточной энергии каждого пучка. Это позволит не только повысить КПД прибора, но и уменьшить тепловую нагрузку соответствующего анода/коллектора, что особенно важно, поскольку традиционный подход со сканирующим коллектором представляется слишком сложным (или даже невозможным) для реализации и следует использовать простой статический адиабатический коллектор. В таком случае потенциал левого анода (потенциал левого катода U_{em1} предполагается равным нулю) следует выбирать близким к $U_{em2} + W_{min2}$ (W_{min2} – минимальная энергия после взаимодействия во внешнем пучке). Соответственно, потенциал правого анода/коллектора должен быть близок к W_{min1} . Здесь W_{min1} – минимальная энергия после взаимодействия внутреннего пучка. Что касается величины U_{em2} , то она зависит от многих факторов, в частности, от разницы рабочих частот внешнего и внутреннего пучков.

3. Особенности построения электродинамической системы

Выбор конструкции резонаторного блока должен осуществляться с учетом схемы ЭОС. Построение электродинамической системы начинается с выбора рабочих типов колебаний, который зависит от требуемых характеристик прибора. Можно выделить основные тенденции построения электродинамической системы такого гиротрона с учетом специфических особенностей.

Связь эл. пучка с ВЧ-полем резонатора в гиротроне осуществляется в полосе циклотронного резонанса [27], которую представим в виде:

$$\frac{s\omega_{Ho}}{\gamma} < \omega < \frac{s\omega_{Ho}}{\gamma} + \frac{2\pi}{T_f}. \quad (1)$$

Здесь γ – Лоренц-фактор, s – номер гармоники, ω_{Ho} – нерелятивистская циклотронная частота, T_f – время пролета электрона в пространстве взаимодействия. Как известно, спектр критических мод как в волноводе круглого сечения, так и в коаксиальном волноводе, дискретен, что ограничивает перечень доступных для прибора рабочих частот, но облегчает селекцию мод. С введением в систему нескольких резонаторов количество доступных для возбуждения мод увеличивается кратно числу вложенных резонаторов.

Для внутреннего резонатора предпочтительным является выбор низкой поперечной моды. Это позволит минимизировать размеры коаксиальной вставки, но может привести к высокой тепловой нагрузке на ее внутреннюю стенку. В свою очередь, для коаксиального резонатора привлекательным является выбор мод шепчущей галереи ($m \ll p$). Собственные характеристики таких мод в гораздо меньшей степени зависят от профиля коаксиальной вставки, при этом тепловое воздействие на нее будет минимальным.

Таким образом, выбор конфигурации блока с вложенными резонаторами и рабочих типов колебаний для электронно-волнового взаимодействия сопровождается поиском баланса между тепловой нагрузкой на стенки резонаторов, особенно на стенки коаксиальной вставки с обеих сторон,

мощностью выходного излучения на требуемых частотах и габаритами резонаторного блока с учетом размеров проходного отверстия магнитной системы.

Вывод излучения из резонатора гиротрона может быть выполнен по аналогии с канонической схемой гиротрона попутно движению электронного пучка. Другим возможным вариантом реализации является вывод излучения навстречу электронному пучку, в сторону электронной пушки по аналогии с [28]. Возможен комбинированный подход: вывод излучения в разные стороны электродинамической системы.

Ниже для примера рассматривается один из возможных вариантов реализации электродинамической системы гиротрона с вложенными резонаторами с одновременной генерацией излучения на частотах 14.4 ГГц и 28 ГГц.

4. Технологический гиротрон с одновременной работой на частотах 14/28 ГГц

Резонаторный блок предложенной модификации гиротрона имеет два соосных резонатора: резонатор круглого сечения небольших размеров и сверхразмерный коаксиальный резонатор. Дизайн резонаторного блока показан на рисунке 4. Оба резонатора разделяет профилированная аксиально-симметричная полая вставка. Далее по тексту параметры, соответствующие внутреннему резонатору, будем обозначать индексом *int*, а внешнему – индексом *ext*.

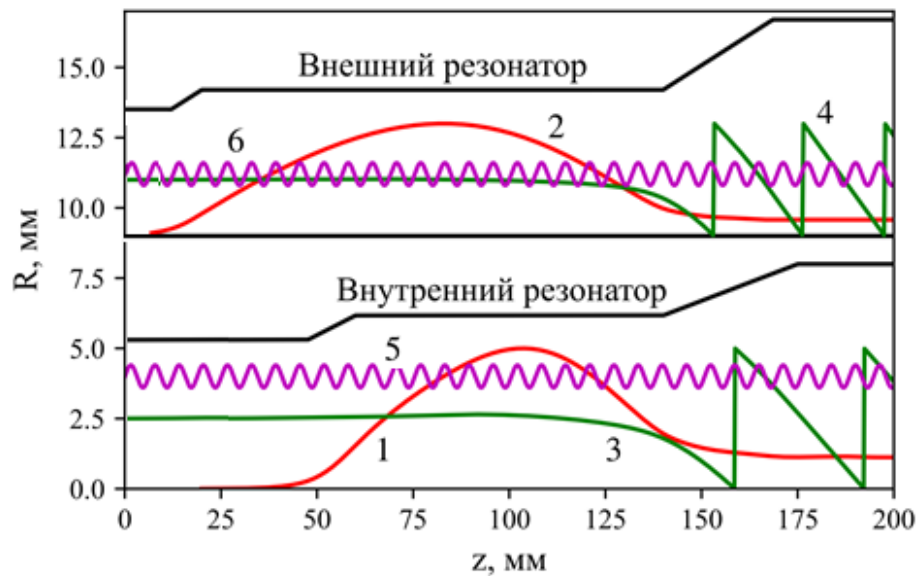


Рис. 4. Конфигурация электродинамической системы, нормированные амплитуды (1, 2) и фазы ВЧ-поля (3, 4) вдоль продольной координаты z . Фиолетовыми линиями показано положение пучков с радиусами 4 мм (5) и 11.2 мм (6).

Гиротрон разрабатывается для работы на моде $TE_{1,1}$ с частотой 14.4 ГГц на основном циклотронном резонансе во внутреннем резонаторе и на моде $TE_{7,1}$ с частотой 28 ГГц на второй гармонике циклотронной частоты во внешнем резонаторе. При этом радиус внутреннего резонатора составил 6.17 мм, радиус коаксиальной вставки – 9 мм, а радиус внешнего резонатора – 14.3 мм.

Статическое магнитное поле системы в области взаимодействия составляет около 0.52 Тл. Тогда при ускоряющем напряжении 25 кВ ларморовский радиус электронов равен около 0.8 мм. Чтобы избежать риска перехвата электронов стенками резонаторов были выбраны радиусы ведущих центров электронов в пространстве взаимодействия $R_0^{int} = 4$ мм, $R_0^{ext} = 11.2$ мм.

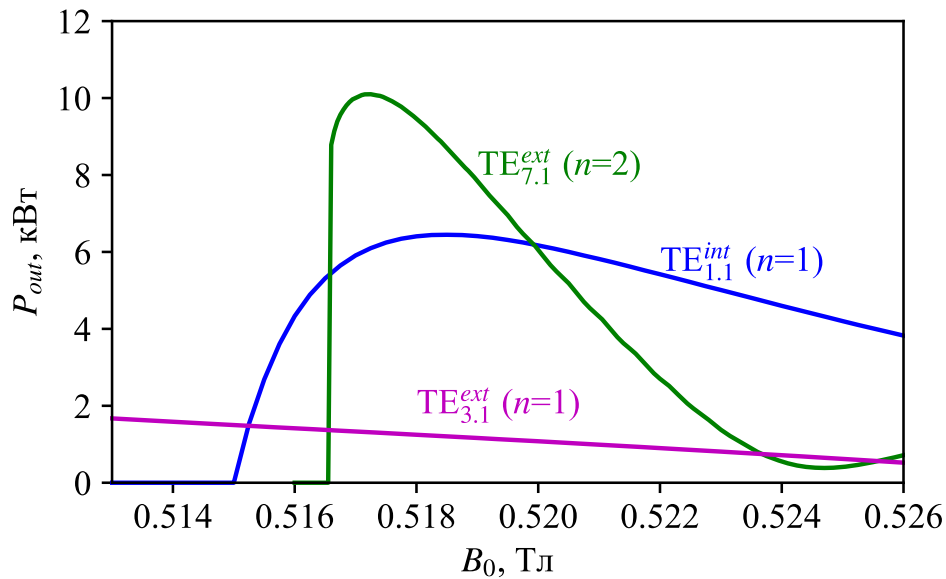


Рис. 5. Зависимость выходной мощности от магнитного поля.

Гиротрон проектируется для работы с высоковольтными источниками питания с напряжением до 25 кВ и током до 2.5 А. Рассматривались два электронных пучка с токами $I_b^{int} = 1$ А и $I_b^{ext} = 2.5$ А. Профиль каждого резонатора оптимизировался с учётом их взаимного расположения в резонаторном блоке. Для описания электронно-волнового взаимодействия использовалась стационарная самосогласованная модель [29, 30]. Расчеты электронно-волнового взаимодействия выполнены для реалистичных значений питч-фактора каждого из пучков $g_{1,2} = 1.3$. Оптимизированные длины регулярных участков резонаторов составили $L^{int} = 80$ мм и $L^{ext} = 120$ мм. На рисунке 5 представлены зависимости выходных мощностей от магнитного поля для рассматриваемой системы вложенных резонаторов. Рабочая мода внешнего резонатора $TE_{7.1}$ имеет конкурентную моду $TE_{3.1}$, которая взаимодействует с пучком на основном циклотронном резонансе. Выбор сценария включения позволяет обеспечить устойчивое возбуждение либо моды $TE_{7.1}$ с частотой излучения 28 ГГц, либо моды $TE_{3.1}$ с частотой около 13 ГГц.

Таким образом, в таком гиротроне возможен режим работы с одновременной генерацией излучения на кратных частотах 14.4 ГГц / 28 ГГц с мощностями выходного излучения 6 кВт и 10 кВт соответственно или режим с одновременным излучением на близких частотах 14.4 ГГц / 13.2 ГГц

с мощностями 6 кВт и 1.5 кВт соответственно. Управляя магнитным полем и ускоряющим напряжением, можно обеспечить переключение с одного режима на другой. При этом удельная тепловая нагрузка на коаксиальную вставку в любом из возможных рабочих режимов не превышает 0.05 кВт/см^2 , что является приемлемым значением с учетом потенциальных сложностей при реализации ее охлаждения.

Рассмотрим подробнее режим с одновременной генерацией излучения на кратных друг к другу частотах. При увеличении магнитного поля от 0.517 Т до 0.522 Т мощность выходного сигнала на частоте 28 ГГц уменьшается, при этом мощность излучения на частоте 14.4 ГГц практически не меняется. Таким образом, в такой системе при помощи выбора статического магнитного поля можно управлять параметром $P_{out}^{ext}/P_{out}^{int}$ в диапазоне от 0.3 до 1.4. Заметим, что небольшое изменение частоты излучения, на доли процента, почти не влияет на ЭЦР нагрев в приложениях физики плазмы.

5. Другие модификации гиротрона с вложенными резонаторами

Предложенную концепцию гиротрона можно модифицировать для построения новых приборов. Возможны самые разные комбинации электронно-оптических и электродинамических подсистем гиротрона в сочетании с традиционными, с распределением, близким к полю магнитного диполя, и нестандартными магнитными системами. Например, одной из таких модификаций является введение в один или каждый резонатор нескольких электронных пучков (рис. 6а). Дополнительный пучок может быть использован для селекции рабочего типа колебаний, что весьма привлекательно для возбуждения моды, синхронной с высокой циклотронной гармоникой, как в [31] или для одновременной генерацией излучения на нескольких частотах в одном резонаторе по аналогии с [19].

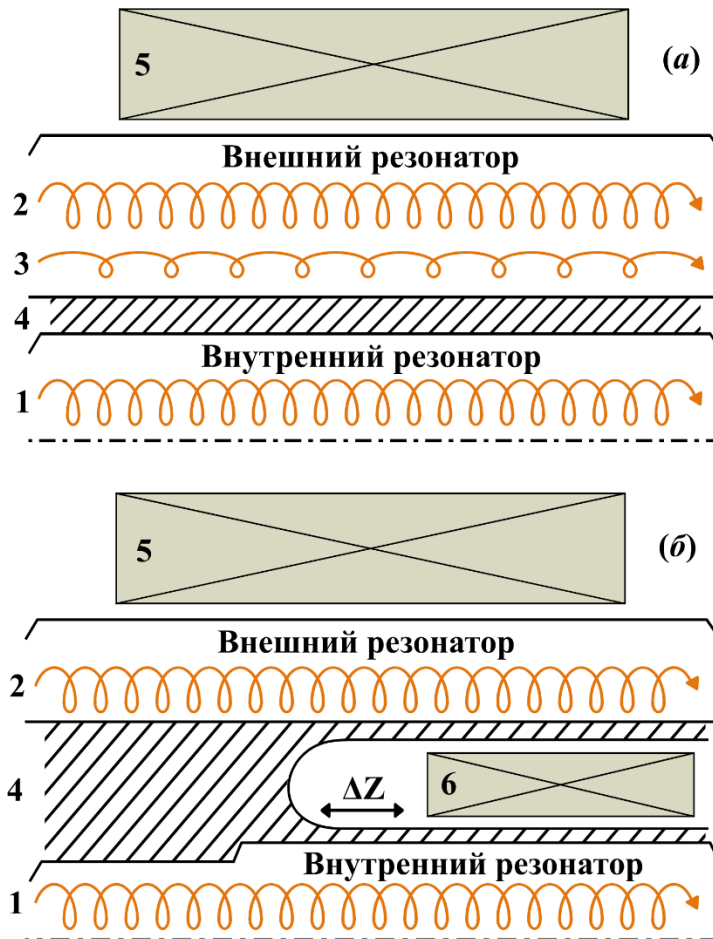


Рис. 6. Примеры схем реализации электродинамической системы гиротрона с вложенными резонаторами и с дополнительной модификацией в виде введения нескольких пучков во внешний резонатор (а) или введения вспомогательного соленоида между внутренним и внешним резонаторами (б): 1, 2 – электронные пучки, введенные во внутренний и внешний резонаторы, 3 – дополнительный пучок во внешнем резонаторе, 4 – полая коаксиальная вставка, 5 – основная магнитная система, 6 – вспомогательный соленоид.

В общем случае интерес представляет возможность создания многочастотного источников с произвольным отношениям частот. Очевидно, выбором конфигурации резонаторов можно обеспечить практически любое отношение собственных частот рабочих мод разных резонаторов, но одновременная генерация ограничена полосой циклотронного резонанса (1). В общем случае возможно лишь последовательное возбуждение этих мод путем изменения магнитного поля.

Заметим, для ЭЦР нагрева плазмы привлекательным является двухчастотный источник излучения, у которого частоты отличаются не в два

раза, как рассмотрено выше, а существенно меньше [6, 11]. В этом случае подход с работой на высоких гармониках гирочастоты с кратными частотами выходного излучения выглядит нецелесообразным ввиду слабой связи пучка с полем. Поэтому рассмотрим другие методы изменения отношения частот выходного излучения.

Для управления параметрами электронных пучков и сдвига полосы циклотронного резонанса (1) в одном из резонаторов привлекательным является изменение энергии электронов, среднего Лоренц-фактора в (1), отдельного пучка в пространстве взаимодействия. Это может быть реализовано при помощи управления напряжением на стенках резонаторов или регулированием катодных напряжений. В рамках такого подхода можно одновременно обеспечить эффективную связь в резонаторах для нескольких типов колебаний с разными частотами. В этом случае возможности по изменению частоты выходного излучения ограничены конструкционной и электрической схемами прибора, а частоты излучения могут отличаться пропорционально отношению $n\gamma_1/m\gamma_2$, где γ_1 и γ_2 – Лоренц-факторы электронов до взаимодействия разных эл. пучков, n и m – натуральные числа, зависящие от номеров циклотронных гармоник, на которых осуществляется связь с ВЧ-полем в резонаторах. В частности, при напряжениях 10 кВ и 20 кВ частоты излучения на одной циклотронной гармонике могут отличаться на 1.9 %, а в случае 40 кВ и 80 кВ – на 7.3 %. В рамках этого подхода частоты выходного излучения могут лишь слабо отличаться при работе на одной циклотронной гармонике. Частотные характеристики двухчастотного излучения при работе на разных гармониках с кратным отношением частот также ограничены.

Для изменения соотношения частот выходного сигнала в гиротроне можно использовать вспомогательный соленоид, размещенный в проходном отверстии основной магнитной системы. В частности, соленоид может быть расположен в области между резонаторами, в коаксиальной вставке (рис. 6б), например, с целью изменить частоту выходного излучения при работе резонаторов на одинаковой циклотронной гармонике при одном поле основной магнитной

системы.

При этом положение вспомогательного соленоида ΔZ может рассматриваться как один из дополнительных инструментов по управлению режимами работы в гиротроне. Похожие магнитные системы с большим полем вспомогательного соленоида предлагались для коллекторных систем [32]. Заметим, реализовать одновременную генерацию излучения на разных частотах при работе на одной циклотронной гармонике возможно и без введения вспомогательного соленоида при помощи размещения резонаторов на участках с разным полем магнитной системы.

Разумеется, для реализации рассмотренных концепций гиротронов требуются магнитные системы с большим проходным отверстием. В сантиметровом диапазоне, где обычно используются теплые магнитные системы с водяным или масляным охлаждением, увеличение размеров магнитной системы может привести к увеличению потребляемой мощности и к существенному росту габаритов гироустановки. Гиротроны с вложенными резонаторами также могут быть реализованы и в миллиметровом диапазоне, где обычно используются свободные от жидкого гелия сверхпроводящие магнитные системы. Подобные магнитные системы с большим диаметром проходного отверстия на данный момент активно развиваются.

Заключение

Предложена новая разновидность гиротрона с оригинальной электродинамической системой, представляющей собой соосно вложенные резонаторы. Такой подход полезно использовать для генерации излучения на близких или кратных друг к другу частотах. Данная модификация благодаря уникальным выходным характеристикам является весьма привлекательной несмотря на некоторое усложнение конструкции по сравнению с обычным гиротроном. В частности, возникает очевидный вопрос крепления и юстировки внутренней полый вставки резонаторного блока. Другой отличительной

особенностью является использование магнитных систем с большим диаметром проходного отверстия.

В качестве примера рассмотрено электронно-волновое взаимодействие в гиротроне с двумя вложенными резонаторами, для одновременной генерации электромагнитного излучения на частотах 14.4 ГГц и 28 ГГц с выходной мощностью до 6 кВт и до 10 кВт соответственно. Как было предложено в [11], в таком варианте излучение на частоте 28 ГГц используется для ЭЦР-нагрева плазмы, а сигнал на частоте 14.4 ГГц используется для подавления плазменных неустойчивостей.

Концепция прибора не ограничена простейшим вариантом схемы с двумя резонаторами. Подход открывает возможность построения новых многочастотных гироприборов. Использование таких приборов востребовано для ряда приложений и может быть более экономически целесообразным, чем использование нескольких одночастотных гиротронов.

Авторы признательны А.И. Цветкову за многочисленные полезные обсуждения.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке по теме FFUF-2022-0007.

Литература

1. Xie Z.Q., Lyneis C.M. Concept for a third generation ECR source at LBL // Proc. of the 12th Int. Workshop on ECR Ion Sources. – 1995. – С. 24.
2. Leitner D. et al. Next generation ECR ion sources: First results of the superconducting 28 GHz ECRIS–VENUS // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2005. – Т. 235. – №. 1-4. – С. 486-493. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.03.230>
3. Zhao H.W. et al. Superconducting ECR ion source: From 24-28 GHz SECRA to 45 GHz fourth generation ECR // Review of Scientific Instruments. – 2018. – Т. 89. – №. 5. – С. 052301. <https://doi.org/10.1063/1.5017479>

4. Li L.X. et al. Production of intense pulsed beams of highly charged ions from a superconducting electron cyclotron resonance ion source // *Physical Review Accelerators and Beams*. – 2022. – T. 25. – №. 6. – C. 063402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.25.063402>
5. Vondrasek R.C., Scott R., Pardo R.C. ECRIS operation with multiple frequencies // *Review of Scientific Instruments*. – 2006. – T. 77. – №. 3. – C. 03A337. <https://doi.org/10.1063/1.2164895>
6. Kitagawa A. et al. Two-frequency heating technique for stable ECR plasma // *Proc. 20th International Workshop on ECRIS*. – 2012. – C. 10-12.
7. Tarvainen O. et al. Beam current oscillations driven by cyclotron instabilities in a minimum-B electron cyclotron resonance ion source plasma // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2014. – T. 23. – №. 2. – C. 025020. <http://doi.org/10.1088/0963-0252/23/2/025020>
8. Tarvainen O. et al. Limitations of electron cyclotron resonance ion source performances set by kinetic plasma instabilities // *Review of Scientific Instruments*. – 2015. – T. 86. – №. 2. – C. 023301. <http://doi.org/10.1063/1.4906804>
9. Izotov I. et al. Measurement of the energy distribution of electrons escaping minimum-B ECR plasmas // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2018. – T. 27. – №. 2. – C. 025012. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aaac14>
10. Tarvainen O. et al. Plasma instabilities of a charge breeder ECRIS // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2017. – T. 26. – №. 10. – C. 105002. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa8975>
11. Skalyga V. et al. Suppression of cyclotron instability in electron cyclotron resonance ion sources by two-frequency heating // *Physics of Plasmas*. – 2015. – T. 22. – №. 8. – C. 083509. <https://doi.org/10.1063/1.4928428>
12. Geller R. *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas*. – New York: Routledge. 1st Edition. 1996. – 434 p. <https://doi.org/10.1201/9780203758663>
13. Bykov Yu. et al. Microwave sources for 3-rd and 4-th generation of ECRIS // *Proc. ECRIS*. Chicago, IL, USA. – 2008. – C. 136.

14. Denisov G.G. et al. A 45-GHz/20-kW gyrotron-based microwave setup for the fourth-generation ECR ion sources // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2018. – Т. 65. – №. 9. – С. 3963-3969. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2859274>
15. Nusinovich G.S. Mode interaction in gyrotrons // International Journal of Electronics. – 1981. – Т. 51. – №. 4. – С. 457-474. <https://doi.org/10.1080/00207218108901349>
16. Sabchevski S.P., Glyavin M.Y., Nusinovich G.S. The progress in the studies of mode interaction in gyrotrons // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2022. – Т. 43. – №. 1. – С. 1-47. <https://doi.org/10.1007/s10762-022-00845-7>
17. Bandurkin I.V. et al. Demonstration of a selective oversized cavity in a terahertz second-harmonic gyrotron // IEEE Electron Device Letters. – 2020. – Т. 41. – №. 9. – С. 1412-1415. <https://doi.org/10.1109/LED.2020.3010445>
18. Denisov G.G. et al. Boosted excitation of the fifth cyclotron harmonic based on frequency multiplication in conventional gyrotrons // Physical Review E. – 2022. – Т. 106. – №. 2. – С. L023203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.L023203>
19. Liu S. et al. The coaxial gyrotron with two electron beams. II. Dual frequency operation // Physics of Plasmas. – 2007. – Т. 14. – №. 10. – С. 103114. <https://doi.org/10.1063/1.2784767>
20. Bandurkin I.V. et al. Double-beam gyrotron with frequency multiplication // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. – Т. 66. – №. 5. – С. 2396-2400. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2905047>
21. Zheleznov I.V. et al. Concept of Dual-Frequency Double-Beam Gyrotron for Plasma Applications // IEEE Electron Device Letters. – 2024. – Т. 45. – №. 9. – С. 1642-1644. <https://doi.org/10.1109/LED.2024.3424652>
22. Запевалов В.Е., Зуев А.С., Куфтин А.Н. Многоствольные гиротроны // Изв. вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 2. – С. 105–114. <https://radiophysics.unn.ru/issues/2020/2/105>

23. Запевалов В.Е., Зуев А.С., Планкин О.П., Семенов Е.С. Многоствольный гиротрон для ДПЯ/ЯМР-спектроскопии // Изв. вузов. Радиофизика. – 2023. – Т. 66. – № 1. – С. 1–20. https://doi.org/10.52452/00213462_2023_66_01_1
24. Tsvetkov A., Manuilov V. A New Concept of an Electron-optical System with Two Counter-propagating Electron Beams for Advanced Gyrotron Designs // 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Chengdu, China, 2023. – С. 1-2. <https://doi.org/10.1109/IVEC56627.2023.10157222>
25. Cao Y. et al. A Cascaded W-Band Gyro-TWT With the Configuration of Coaxial and Circular Waveguides // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2023. – Т. 70. – №. 4. – С. 1906-1911. <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3241879>
26. Запевалов В.Е., Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. Электронно-оптические системы двухлучевых гиротронов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1991. – Т. 34. – №. 2. – С. 205–210. <https://radiophysics.unn.ru/issues/1991/2/205>
27. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotron. – Baltimore: The Johns Hopkins University Press. 2004. – 336 p.
28. Братман В.Л. и др. Компактный источник ТГц-излучения для повышения чувствительности ядерного магнитного резонанса путем динамической поляризации ядер // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2018. – Т. 82. – №. 12. – С. 1760-1765. <https://doi.org/10.1134/S036767651812027X>
29. Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А. Численное моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия в резонаторах мощных гиротронов с частотой 300 ГГц // Изв. вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64. – №. 3. – С. 192–205. https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_03_192
30. Семенов Е.С. и др. Анализ режимов генерации в технологическом гиротроне с магнитоэкранированной системой в среде ANGEL // Изв. вузов. Радиофизика. – 2023. – Т. 66. – №. 7-8. – С. 645–663. https://doi.org/10.52452/00213462_2023_66_07_645

31. Idehara T. et al. A novel THz-band double-beam gyrotron for high-field DNP-NMR spectroscopy // Review of Scientific Instruments. – 2017. – Т. 88. – №. 9. – С. 094708. <https://doi.org/10.1063/1.4997994>
32. Manuilov V.N., Morozkin M.V., Louksha O.I., Glyavin M.Yu. Gyrotron collector systems: Types and capabilities // Infrared Physics & Technology. – Т. 91. – С. 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.03.024>

Для цитирования:

Глявин М.Ю., Зуев А.С., Мануилов В.Н., Скалыга В.А. Многолучевые гиротроны с вложенными резонаторами // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.8>