

Компактный гиротрон с рабочей частотой 395 ГГц

В.Е. Запевалов, А.С. Зуев, О.П. Планкин, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

Аннотация. Представлен новый тип гиротрона с приосевым пучком. Новая модификация гиротрона выгодно отличается тем, что не используются неадиабатические эффекты для формирования приосевого винтового пучка и может быть использован обычный типовой магнит. Достигается такое преимущество ценой нарушения азимутальной симметрии электродов системы. Предложенный гиротрон может быть использован совместно с «бюджетными» криомагнитами с малым проходным отверстием. Рассмотрение особенностей нового прибора проведено на примере гиротрона с рабочей частотой 395 ГГц, работающего на второй гармонике. Проведенный анализ показал, что мощность выходного излучения такого прибора может составить десятки ватт, что достаточно для многих потенциальных приложений, например, для динамической поляризации ядер в спектроскопии ядерного магнитного резонанса.

Ключевые слова: ЯМР, ДПЯ, спектроскопия, гиротрон, высокая циклотронная гармоника, терагерцовое излучение, электронные пучки

1. Введение

Одним из направлений развития гиротронов [1, 2] является разработка источников излучения субтерагерцового и терагерцового диапазонов с умеренным уровнем мощности. Такие источники востребованы в спектроскопии ядерного магнитного резонанса (NMR-спектроскопии) для динамической поляризации ядер (DNP), в медико-биологических приложениях, в «терапидении» (получение контрастных изображений в ТГц-излучении) и в других приложениях [3–5]. Для этих приложений требуются источники с мощностью излучения не более десятка ватт.

Канонический гиротрон по уровню мощности превосходит потребности на несколько порядков, сложен в эксплуатации и стоит очень дорого. В этой связи растет интерес к развитию новых приборов промежуточного уровня мощности, уменьшению габаритов установки и снижению её стоимости, включая источники питания, магнитную систему, системы управления, охлаждения и др.

В настоящей работе обсуждаются возможности существенного уменьшения габаритов и снижения стоимости гиротрона при обеспечении приемлемого уровня выходной мощности, путем использования новой модификации электронной пушки.

2. Концепция прибора

Концепция новой модификации электронно-оптической системы (ЭОС) изображена на рисунке 1. Для формирования приосевого винтового электронного пучка (приосевого ВЭП) с помощью скрещенных электрического и магнитного полей (подобно адиабатической магнетронно-инжекторной пушке [2]) эмиттер размещён вблизи оси симметрии магнитной системы под некоторым углом. При движении в нарастающем магнитном поле электронный пучок компрессируется с увеличением доли поперечной энергии и поступает в квазирегулярный резонатор кругового сечения для электронно-волнового взаимодействия. Связь приосевого электронного пучка с высокочастотным полем в резонаторе осуществляется подобно гиротрону с большой орбитой (ГБО) [6–8] с высокой селекцией рабочих мод. Выходящий из резонатора излучение транспортируется либо непосредственно на рабочей моде, либо, при

необходимости, преобразуется в моду требуемой структуры, либо в волновой пучок и выводится через выходное окно. Отработанный электронный пучок с помощью дополнительных катушек осаждается на стенки коллектора.

Похожий подход был предложен Я. Боттом ещё в 1964 году [9], но тогда эта идея не имела должного развития.

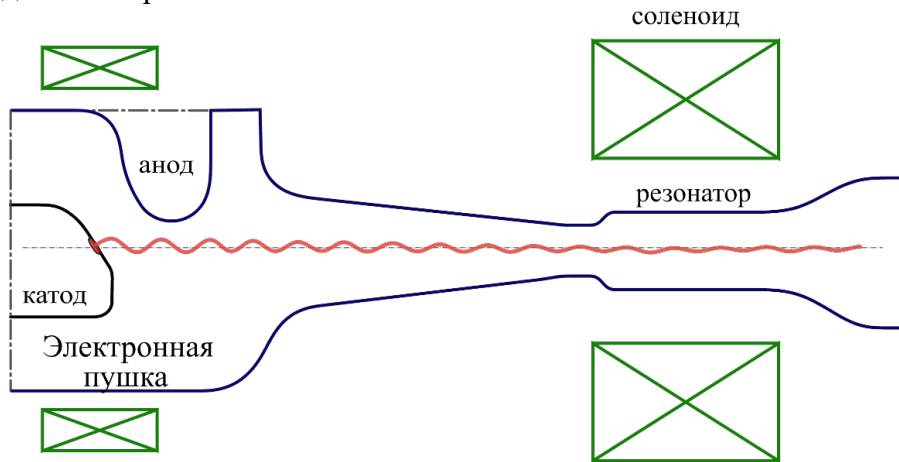


Рисунок 1. Схема нового варианта гиротрона с приосевым пучком

Заметим, здесь не используются сложные неадиабатические системы для формирования приосевого ВЭП в отличие от других ГБО, где используются системы с кикером или реверсом магнитного поля. Главной особенностью предложенного типа гиротрона является использование адиабатической электронно-оптической системы с нарушением азимутальной симметрии.

3. ЭОС гиротрона с частотой излучения 395 ГГц

Для примера рассмотрим вариант предложенного типа гиротрона с частотой излучения 395 ГГц на второй циклотронной гармонике. Гиротрон проектируется для работы в составе комплекса с широко распространённым криомагнитом JASTEC-10T100 или его многочисленными аналогами.

Численное моделирование выполнено при помощи пакета программ CST Studio Suite [10] и разработанного в ИПФ РАН оригинального комплекса программ ANGEL [11, 12] для варианта ЭОС на базе фрагмента азимутально-симметричной электронной пушки. Для упрощения модели рассматривалась эмиссия с сектора аксиально-симметричного катода.

На рисунках 2а и 2б показаны фронтальный вид и вид сбоку спроектированной электронной пушки, на рисунке 2с — изометрический вид, полученный в пакете программ CST Studio Suite. На рисунке 2б красным контуром выделена часть конфигурации, конструктивно необходимая для формирования требуемого электронного пучка. Как видно, новый вариант ЭОС оказывается достаточно компактным, то есть может быть использован совместно с криомагнитами с малым проходным отверстием, это позволит существенно снизить стоимость гиротронного комплекса за счёт использования более дешевого криомагнита.

Для гибкого управления параметрами электронного потока использовалась триодная схема с ускоряющим напряжением 12 кВ и анодным напряжением 10 кВ. Индукция магнитостатического поля в рабочем пространстве составила около 7.2 Тл, а коэффициент магнитной компрессии был равен 22. Максимальная напряженность поля была локализована вблизи катодного носика и составила не более 7.2 кВ/мм, наибольшая напряженность поля на эмиттере — 4.4 кВ/мм.

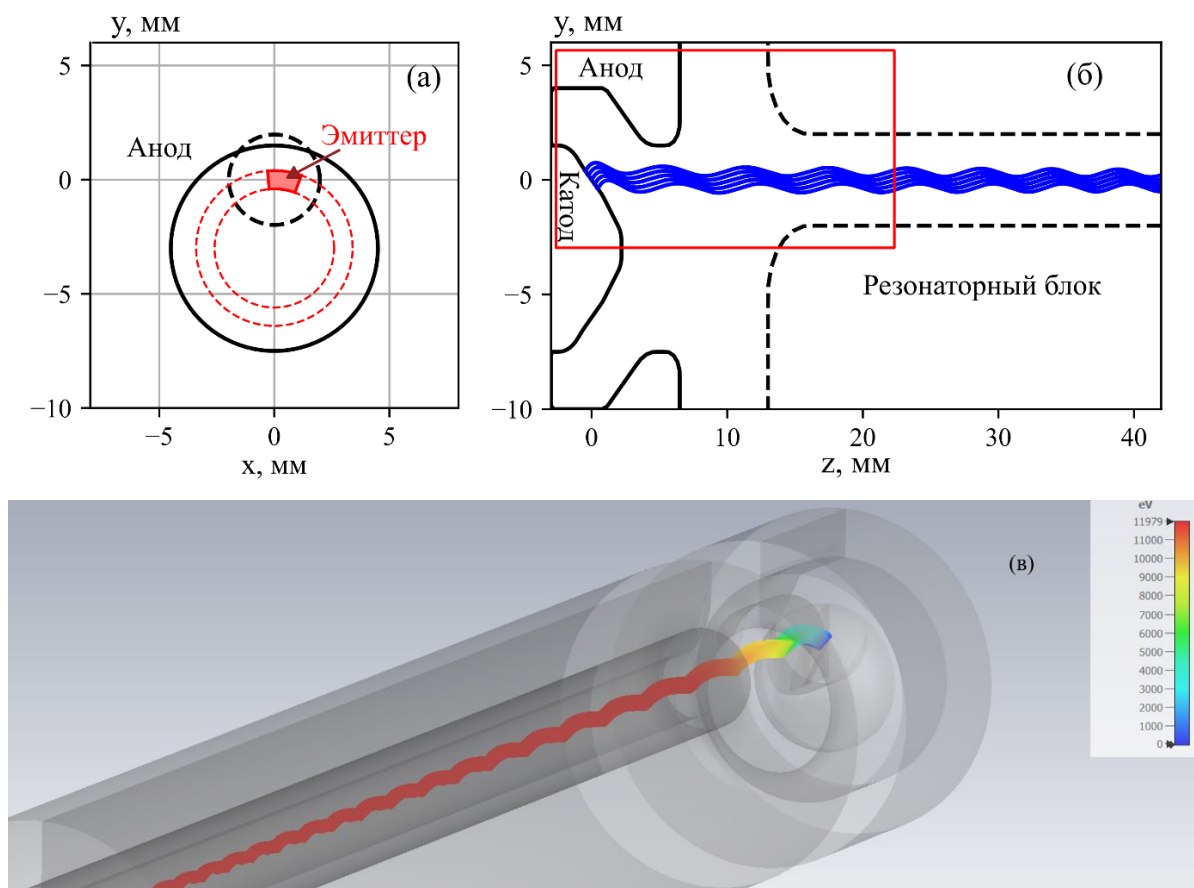


Рисунок 2. Конфигурация электронно-оптической системы «компактного» 395 ГГц гиротрона. Фронтальный вид (а), вид сбоку (б), изометрический вид (в).

При токе пучка около 70 мА и плотности тока эмиссии около 4.2 А/см^2 расчётный питч-фактор составил около 1.4. При большем токе качество ВЭП существенно снижается и появляется отраженный ток, вызванный ростом влияния пространственного заряда на процесс формирования ВЭП.

4. Оптимизация процессов взаимодействия пучка с высокочастотным полем в резонаторе.

Расчёт электронно-волнового взаимодействия выполнен в рамках модели [8] с учетом омических потерь на стенках резонатора, профилированного внешнего поля и разброса осцилляторных скоростей электронов. При моделировании был задан ток пучка 70 мА, питч-фактор 1.4 и разброс осцилляторных скоростей 30% (оценка сверху). Для работы на второй гармонике гирочастоты выбрана мода $TE_{2.5}$. Из-за использования приосевого пучка в гиротроне практически отсутствует конкуренция мод. Радиус регулярной части резонатора составил 1.98 мм. В расчётах задавался тонкий пучок, расположенный точно на центральной оси магнитной системы и резонатора. Оптимизированная длина резонатора составила 20 мм (26λ). На рисунке 3 приведены зависимости мощности выходного излучения от рабочего тока при разных питч-факторах. Несмотря на то, что рабочий режим чувствителен к значению питч-фактора пучка, в рассмотренных случаях рабочий ток $I_b = 70 \text{ мА}$ превышает стартовый ток в 1.5–4 раза.

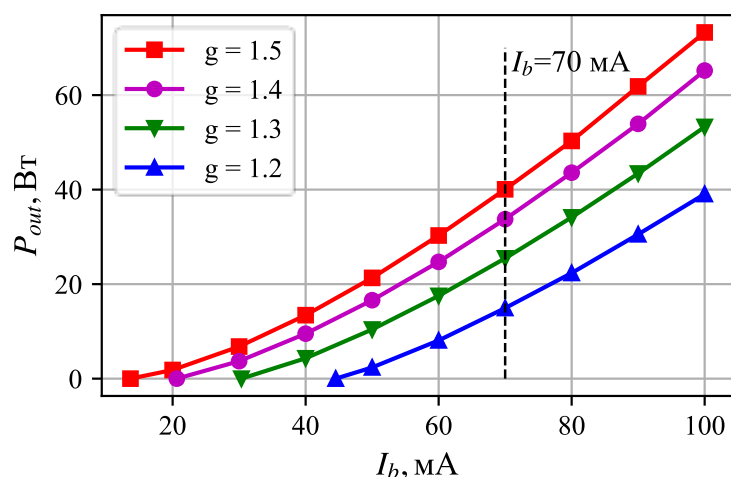


Рисунок 3. Зависимости мощности выходного излучения от рабочего тока при питч-факторах 1.2, 1.3, 1.4 и 1.5 при длине резонатора 20 мм.

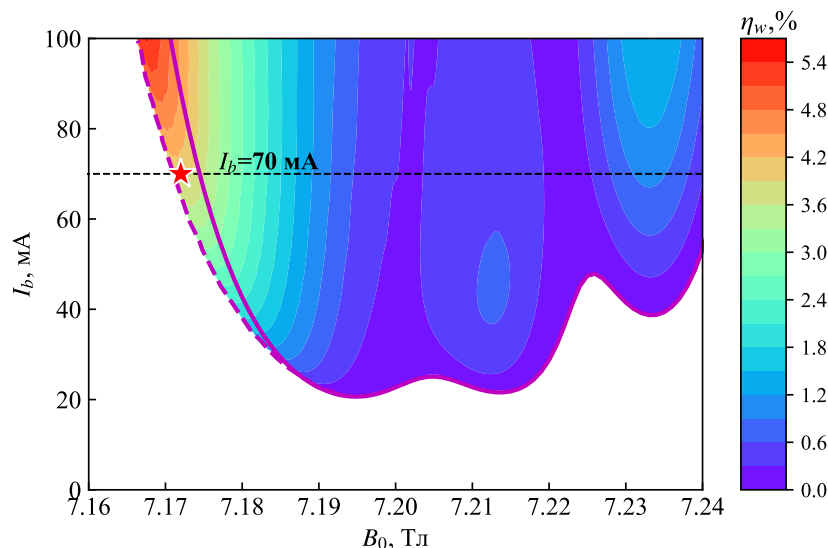


Рисунок 4. Изолинии волнового КПД от магнитного поля и тока пучка при питч-факторе 1.4 и длине резонатора 20 мм.

На рисунке 4 показаны области с разными уровнями КПД на плоскости магнитного поля и тока пучка при питч-факторе 1.4 и длине резонатора 20 мм. Сплошной линией на рисунке показана полученная в рамках линейной теории зависимость стартового тока от магнитного поля, пунктирной линией — граница устойчивости режима с жёстким возбуждением. В точке с максимальным КПД при токе 70 мА выходного излучения составила более 30 Вт с волновым и электронным КПД 4% и 15% соответственно. Такого уровня мощности вполне достаточно для спектроскопических приложений гиротрона. При помощи одноступенчатой рекуперации КПД гиротрона может быть увеличен примерно в два раза с упрощением систем питания и охлаждения, а также защиты от рентгеновского излучения.

Гиротрон допускает дальнейшие модификации для различных приложений. Для упрощения и удешевления системы может быть использован диодный вариант ЭОС с напряжением около 10 кВ. Для плавной перестройки частоты, востребованной в спектроскопии [3, 4, 13], может использоваться резонатор с изменяемой конфигурацией подобно [14]. Кроме того, привлекательным является разработка подобных гиротронов для работы на более высоких гармониках, но при этом для повышения КПД целесообразно повысить ускоряющее напряжение.

5. Заключение

В работе рассмотрен новый тип гиротрона с приосевым пучком, перспективный для ДПЯ/ЯМР-спектроскопии и других приложений. Главной особенностью предложенного типа гиротрона является использование электронно-оптической системы с нарушенной азимутальной симметрией при сохранении ее адиабатичности. В гиротроне может быть использован обычный типовой магнит с квазидипольным распределением для формирования электронного пучка. Данная модификация гирорезонансного прибора позволяет существенно уменьшить габариты и удешевить гиротронную установку при помощи использования сравнительно недорогой магнитной системы с малым диаметром проходного отверстия.

В рассмотренных гиротронах используется тонкий приосевой ВЭП, что существенно снижает достижимую мощность прибора по сравнению с каноническим вариантом с трубчатым ВЭП [15], но в то же время существенно превосходит мощность классических электронных приборов [1, 2]. Отметим, что благодаря эффективной селекции рабочей моды предложенная концепция перспективна для работы на высоких, главным образом, на второй и третьей, циклотронных гармониках. Переход к работе на более высокую гармонику гирочастоты позволит существенно снизить требования к магнитному полю, что, однако, дополнительно приведет к снижению КПД и выходной мощности. Типичный уровень выходной мощности обсуждаемых гироприборов является вполне достаточным для многих потенциальных приложений.

Работа выполнена в рамках **проекта ИПФ РАН FFUF-2022-0007**.

Список литературы

1. Nusinovich G. S. et al. The Gyrotron at 50: Historical Overview // J. Infr. Millim. THz Waves. – 2014. – Т. 35. – №. 4. – С. 325-381.
2. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков: Пер. с англ. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012.
3. Глявин М. Ю. и др. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – №. 6. – С. 667-677.
4. Temkin R. J. Development of terahertz gyrotrons for spectroscopy at MIT. // Terahertz Science and Technology. – 2014. – Т. 7. – №. 1. – С. 1–9.
5. Sabchevski S., Glyavin M. Development and Application of THz Gyrotrons for Advanced Spectroscopic Methods. // Photonics. – 2023. – Т. 10. – №. 2. – P. 189.
6. Jory H. R., Trivelpiece A. W. Charged-Particle Motion in Large-Amplitude Electromagnetic Fields // J. Appl. Phys. – 1968. – Т. 39. – №. 7. – С. 3053–3060.
7. Idehara T. et al. A High Harmonic Gyrotron With an Axis-Encircling Electron Beam and a Permanent Magnet. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2004. – Т. 32. – №. 3. – С. 903-909.
8. Братман В. Л. и др. Субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны с большой орбитой // Изв. вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52. – №. 7. – С. 525-535.
9. Bott I. B. Pat. 1096921 (UK). Radiation Generators. Publ. 29.12.1967.
10. <https://www.3ds.com>
11. Планкин О. П., Семенов Е. С. Комплекс программ ANGEL-2DS для моделирования пушки гиротрона. Инструкция для пользователя. // Методическая разработка. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2011.
12. Планкин О. П., Семенов Е. С. Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона. // Вестник НГУ, серия «Физика». – 2013. – Т. 8. – №. 2. – С. 44-54.
13. Антаков И. И. и др. Применение больших мощностей резонансного излучения для увеличения чувствительности микроволновых спектроскопов. // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19. – №. 10. – С. 634.
14. Антаков И. И. и др. МЦР-генераторы с механической перестройкой частоты. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1975. – №. 8. С. 20-25.
15. Запечалов В. Е. Неканонические гиротроны. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61. – №. 4. – С. 305-314.