

Квазиоптическая гиро-ЛОВ с зигзагообразной линией передачи: результаты первых экспериментов

А.А. Богдашов, И.Г. Гачев, Г.Г. Денисов, М.В. Каменский, К.А. Лещёва, Е.М. Новак,
А.В. Савилов, С.В. Самсонов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: представлены результаты первых экспериментов с новой разновидностью мазера на циклотронном резонансе (МЦР), в котором гауссов волновой пучок транспортируется по зигзагообразной траектории, от зеркала к зеркалу, и несколько раз пересекается с электронным пучком под прямым углом. В местах этих пересечений происходит резонансное циклотронное электронно-волновое взаимодействие и генерируется мощное электромагнитное излучение на уровне от 0,2 до 1,2 кВт в виде гауссова волнового пучка. В данном МЦР за счет изменения индукции магнитного поля реализована кусочно-линейная перестройка частоты генерации в полосах около 5 ГГц, перекрывающих диапазон 90 – 195 ГГц с коэффициентом заполненности около 70%.

Ключевые слова: мазер на циклотронном резонансе (МЦР), гиротронная лампа обратной волны (гиро-ЛОВ), квазиоптическая зигзагообразная система, микроволновые волны.

1. Введение

В настоящее время микроволновые (суб-терагерцовые) источники весьма востребованы для целого ряда научных и практических приложений. В первую очередь можно отметить спектроскопические приложения, в особенности, спектроскопию ядерного магнитного резонанса с динамической поляризацией ядер (ЯМР/ДПЯ-спектроскопия) высокого разрешения [1]. Для данного научного направления достаточно актуальными являются источники излучения с возможностью плавной перестройки частоты в широком диапазоне при уровнях мощности (десятки-сотни ватт), которые не могут быть обеспечены твердотельными генераторами.

Недавно предложенный вариант мазера на циклотронном резонансе (МЦР) с зигзагообразной квазиоптической линией передачи [2] позволяет реализовать гораздо более широкополосную плавную перестройку частоты генерации по сравнению с гиротроном (наиболее развитой разновидностью МЦР) [3, 4]. Данный прибор может работать как в режиме усилителя (гиро-ЛБВ), так и в режиме генератора (гиро-ЛОВ). Принцип работы такой гиро-ЛОВ основан на использовании открытой квазиоптической многозеркальной линии передачи, в которой гауссов волновой пучок транспортируется зеркалами по зигзагообразной траектории и периодически пересекается с электронным винтовым пучком под прямым углом (рисунок 1). В местах таких пересечений происходит резонансное циклотронное электронно-волновое взаимодействие и генерируется излучение. Основной особенностью данного прибора является наличие возможности широкой перестройки частоты излучения за счёт изменения внешнего статического магнитного поля. Трёхмерное моделирование и расчёты показывают, что данная концепция перспективна и позволяет разрабатывать и создавать относительно мощные генераторы субмиллиметрового диапазона с октавной полосой перестройки частоты [5 – 8].

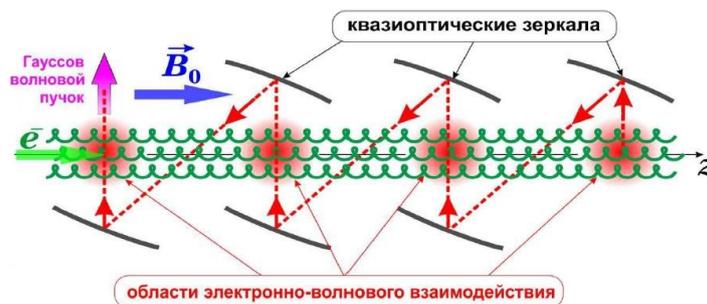


Рисунок 1. Общая схема работы квазиоптической зигзагообразной giro-ЛОВ.

На основе приборной базы и экспериментального оборудования, имеющегося в нашем распоряжении, нами был разработан и изготовлен первый образец прибора подобного типа для экспериментальной проверки работоспособности приведённой концепции и giro-ЛОВ, в частности.

2. Конструкция прибора

При разработке конструкции первой зигзагообразной квазиоптической giro-ЛОВ учитывались параметры имеющихся в наличии источников питания и магнитных систем. Габаритные размеры электродинамического узла были ограничены диаметром «тёплого» отверстия сверхпроводящего магнита (160 мм) с максимальной индукцией поля около 7 Тл и длиной однородного участка поля около 40 мм, которая была увеличена до 50-70 мм с помощью вставки специальной корректирующей втулки из железа.

Электродинамическая система квазиоптической giro-ЛОВ (рисунок 2) представляет собой набор из 6 конфокальных зеркал диаметром 15 мм, расположенных на расстоянии 15 мм и 19 мм по продольной и вертикально оси соответственно. Зеркала и пространство взаимодействия окружены корпусом из нержавеющей стали с пирамидальной гофрировкой под углом для повышения поглощения «паразитного» излучения. Данный прибор имеет два канала транспортировки излучения. В первом канале генерируемая волна направляется из зоны взаимодействия по сверхразмерному круглому гофрированному волноводу (в основном в виде линейно-поляризованной моды HE_{11}) и далее с помощью зеркал выводится в нагрузку под углом Брюстера к выходному окну. Такой подход к выводу излучения реализован с целью увеличения полосы пропускания выходного окна. Второй аналогичный канал использовался для контроля того, что основная мощность выводится через основной канал. Также он будет, возможно, использоваться для проверки работы прибора в режиме усилителя.



Рисунок 2. Электродинамическая система квазиоптической зигзагообразной giro-ЛОВ.

Одним из важных элементов электронно-оптической системы прибора является магнетронно инжекторная пушка (МИП). Расчёты показали, что для имеющегося сверхпроводящего магнита и высоковольтных источников питания требования к

электронному пучку в области взаимодействия, следующие: ускоряющее напряжение – 15-25 кВ, ток электронного пучка – 2-3 А, питч-фактор – 1,6-1,7, радиус пучка около 2 мм и ширина 0,5 мм в диапазоне магнитных полей от 4 до 8 Тл. Для обеспечения работы пушки в таком широком диапазоне магнитных полей была выбрана триодная конфигурация МИП с дополнительным электродом (изолированным анодом). Это позволяет сохранять постоянной отношение поперечной к продольной скорости электронов в катодной области за счёт увеличения потенциала на аноде при одновременном увеличении индукции магнитного поля криомагнита [9].

Также в электронно-оптической системе, данной giro-ЛОВ была предусмотрена возможность одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронов, что позволило в эксперименте существенно повысить КПД прибора и снизить нагрузку на его коллектор.

3. Результаты первых экспериментов

Экспериментальное исследование состояло из «холодных» и «горячих» измерений. Перед финальной сборкой прибора была проведена проверка ключевых узлов giro-ЛОВ, таких как электродинамическая система, которую мы описывали выше. Чтобы осуществить проверку данной системы во всём диапазоне частот были изготовлены два комплекта преобразователей на два диапазона частот: 110-170 ГГц и 150-220 ГГц. Они требовались для преобразования моды прямоугольного волновода в гауссов волновой пучок. Для проведения «холодных» измерений использовался векторный анализатор сигналов Seuear 3672B, позволяющий измерять как уровень прохождения сигнала, так и уровень отражения. Согласно проведённым измерениям, уровень отражения сигнала был ниже -20 дБ в диапазоне частот 95-210 ГГц. Результаты измерений прохождения сигнала соответствовали результатам расчётов и моделирования, как показано на рисунке 3. Потери при прохождении гауссова пучка через один канал составляли менее 10%. Результаты измерений показали, что электродинамическая зигзагообразная система изготовлена и собрана правильно. Было также протестировано прохождение гауссового пучка, выходящего из каждого волноводного канала, через выходное Брюстеровское окно. Результаты измерений структуры поля в поперечном сечении за окном на нескольких дискретных частотах, также показали хорошее соответствие полученных результатов с ожидаемыми.

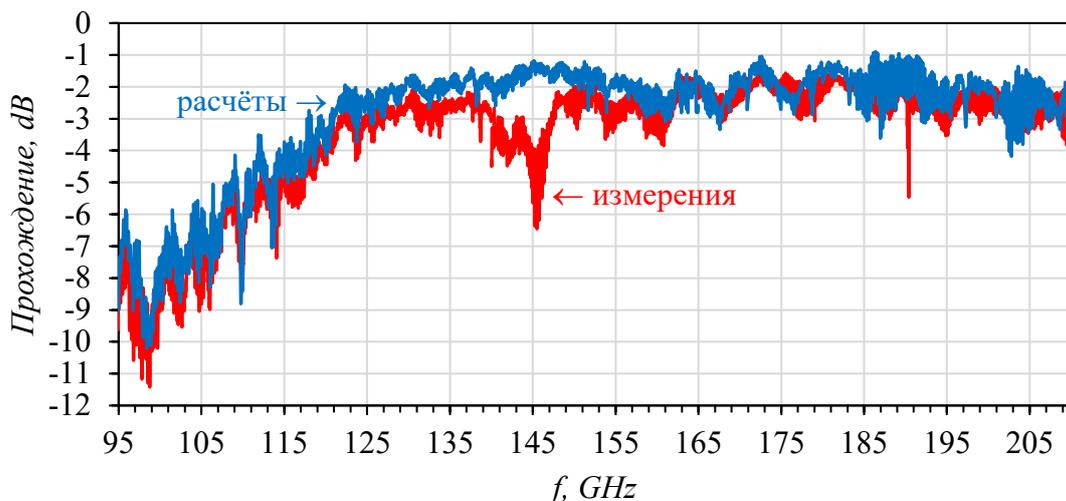


Рисунок 3. Сравнение измеренного уровня прохождения излучения через электродинамическую систему giro-ЛОВ с результатами моделирования (красным показаны результат измерений, синим показаны результаты расчётов).

После завершения «холодных» экспериментов была проведена окончательная сборка и герметизация прибора, его откачка и обезгаживание в специальном технологическом стенде. Далее гиро-ЛОВ была установлена в испытательный стенд и криомагнит. К прибору были подключены все необходимые источники питания и трубки системы охлаждения. Электропитание прибора состояло из набора отдельных источников питания постоянного тока. Ток электронного пучка до 2 А и напряжение на катоде до -10 кВ обеспечивалось источником питания отрицательной полярности. Регулирование напряжения на аноде и соответственно подстройка пичч-фактора под магнитное поле осуществлялось с помощью положительного слаботоочного анодного источника питания, а положительный потенциал, приложенный к микроволновой системе от отдельного также слаботоочного источника питания, позволял увеличить энергию электронов до значений, оптимальных с точки зрения электронно-волнового взаимодействия. Коллекторная часть прибора была заземлена, что позволяло осуществить частичную рекуперацию энергии электронного пучка.

В экспериментах было убедительно продемонстрировано то, что прибор работает в ожидаемом режиме гиро-ЛОВ. На выходе рабочего СВЧ канала была зарегистрирована основная мощность киловаттного уровня. Короткое включение на время около 1 сек. позволяло получить «прожиг» или отпечаток на термобумаге в виде пятна почти круглой формы в соответствии с ожидаемой формой и размером гауссового пучка. В тоже время на выходе второго окна мощность излучения в рабочих режимах была более чем на порядок меньше. Основной измеряемой характеристикой являлась зависимость мощности и частоты генерируемого излучения от плавно перестраиваемого магнитного поля. При этом параметры электропитания прибора были следующими: ток пучка – 2А, напряжение на катоде – 6 кВ, напряжение на резонаторе – 11 кВ, напряжение на аноде – 1-12 кВ.

Как показано на рисунке 4, при увеличении магнитного поля от 3,6 до 7,2 Тл рост частоты происходил плавно с некоторыми скачкообразными переходами, которые находились на равных расстояниях шириной около 7 ГГц. В местах перехода измеряемый спектр становился многочастотным и зашумлённым. Однако полная полоса перестройки частоты составила от 90 до 195 ГГц. График изменения мощности тоже имеет осциллирующий характер: значения мощности варьируются в диапазоне от 0,2 до 1,2 кВт. В точках с минимальной мощностью спектр имеет низкое качество и происходит перескок частоты генерации. В итоге, полосы частот, в которых могут генерироваться одночастотные колебания, составляют около 70% от полного диапазона перестройки частоты 90-195 ГГц.

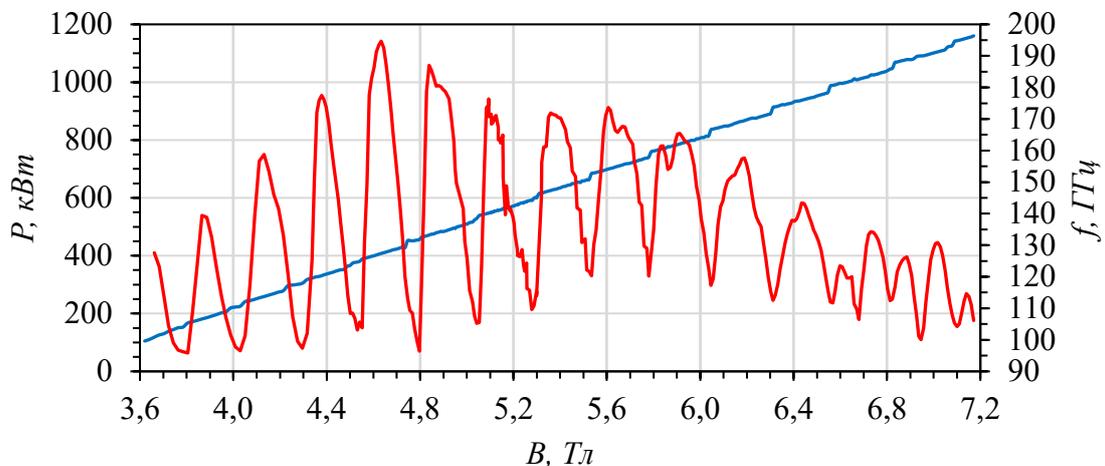


Рисунок 4. Зависимость мощности и частоты генерации гиро-ЛОВ от магнитного поля (красным показана мощность, синим показана частота).

4. Заключение

В ходе первых «горячих» экспериментов с новой разновидностью gyro-ЛОВ было показано, что концепция прибора полностью работоспособна. Новая зигзагообразная квазиоптическая электродинамическая система позволяет формировать и транспортировать электромагнитное излучение в виде гауссова волнового пучка высокого качества. Gyro-ЛОВ позволяет генерировать микроволновое излучение мощностью от 0,2-1,2 кВт при перестройке частоты в диапазоне 90-195 ГГц за счёт плавного изменения магнитного поля криомагнита от 3,3 до 7,3 Тл. Полосы с линейной непрерывной перестройкой частоты генерации шириной приблизительно по 5 ГГц заполняют рабочий диапазон с коэффициентом около 70%. При этом выходное излучение имеет форму близкую к гауссовому волновому пучку. Максимальный КПД прибора при использовании одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронного пучка составил около 12%.

В ближайшее время планируется провести серию экспериментов с новой магнитной системой и более стабильными высоковольтными источниками питания.

Исследование выполнено за счёт **гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00443)** и при поддержке Института прикладной физики Российской академии наук, **проект FFUF-2022-0007**.

Список литературы

1. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Запелалов В.Е. [и др.] «Терагерцевые гиротроны: состояние и перспективы» // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 8. – С. 745. – DOI 10.7868/S0033849414080075. – EDN SGVWAH.
2. Samsonov S.V., Denisov G.G., Bogdashov A.A. and Gachev I.G., «Cyclotron Resonance Maser with Zigzag Quasi-Optical Transmission Line: Concept and Modeling» // IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 68, No. 11, 5846-5850, 2021. doi: 10.1109/ted.2021.3114141.
3. Thumm M. «State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers» // J. Infr., Millim., THz Waves, Vol. 41, No. 1, 1-140, 2020, doi: 10.1007/s10762-019-00631-y.
4. Nusinovich G.S. «Introduction to the Physics of Gyrotrons» // Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, MD, USA, 2004.
5. Samsonov S.V., Denisov G.G., Bogdashov A.A., Gachev I.G., Kamenskiy M.V., Leshcheva K.A. «Design of one-octave bandwidth gyro-BWO with zigzag quasi-optical transmission line» // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), 248-253, Tomsk, Russia, October 2022. doi: 10.56761/EFRE2022.S3-O-034602.
6. Samsonov S.V., Denisov G.G., Bogdashov A.A., Gachev I.G., Kamenskiy M.V. and Leshcheva K.A. «Quasi-Optical Gyro-BWO With Zigzag Transmission Line as One-Octave Bandwidth Sub-THz Source» // Proceedings of the 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 1-2, Chengdu, China, April 2023. doi: 10.1109/IVEC56627.2023.10156909.
7. Novak E.M., Samsonov S.V., Savilov A.V. «Small-Signal Theory of the Gyro-BWO With the Zigzag Quasi-Optical System» // IEEE Trans. Electron Devices, vol. 69, no. 9, Jul. 2022, pp. 5199-5205, doi: 10.1109/TED.2022.3188604.
8. Novak E.M., Samsonov S.V., Savilov A.V. «Spatio-temporal theory of the sectioned gyro-BWO with the zigzag quasi-optical system» // Physics of Plasmas, vol. 30, no. 4, 2023, Art. no. 043101, doi: 10.1063/5.0140591.
9. Гачев И.Г., Каменский М.В., Лещева К.А., Самсонов С.В. «Магнетронно-инжекторная пушка для квазиоптической gyro-ЛОВ с октавной полосой перестройки частоты» // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2022. – Т. 1. – С. 164-168. – EDN UURBVU.