

Измерения Брюстеровского окна giro-ЛОВ

А.А. Богдашов, С.В. Самсонов

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

Аннотация: Квазиоптическая giro-ЛОВ представляет собой гироскоп с зеркальной линией, помещенной в магнитное поле и формирующей области взаимодействия на соответствующих пересечениях волнового и электронного пучков, где выполняются условия циклотронного резонанса. В рассматриваемой giro-ЛОВ ожидается генерация монохроматического излучения с перестройкой в полосе частот 100 – 220 ГГц при уровне выходной мощности около 1 кВт. Вывод излучения из области взаимодействия осуществляется с помощью гофрированного волновода и системы квазиоптических зеркал. Важным элементом электродинамической системы является вакуумное Брюстеровское окно. Для проверки выходного узла квазиоптической giro-ЛОВ на малом уровне мощности разработан преобразователь моды TE₁₀ волновода WR5 в HE₁₁ моду гофрированного волновода. Представлены результаты измерений Брюстеровских окон в диапазоне частот 140 - 200 ГГц с помощью стандартного генератора.

Ключевые слова: квазиоптическая giro-ЛОВ, Брюстеровское окно, мода HE₁₁ гофрированного волновода, оптимизация роём частиц (Particle Swarm Optimization)

1. Введение

Гиротроны с перестройкой частоты магнитным полем являются источниками мощного микроволнового излучения и находят широкое применение в спектроскопии и физике плазмы [1, 2]. В сравнении с гиротроном основным преимуществом квазиоптической giro-ЛОВ является возможность плавной перестройки частоты излучения в широкой полосе [3]. В рассматриваемом проекте диапазон перестройки составляет 100 – 220 ГГц. Применение квазиоптических зеркал и сверхразмерных гофрированных волноводов выглядит естественным решением для передачи излучения внутри прибора и его вывода из вакуумного объема. Нужно отметить, что использование Брюстеровского окна не является чем-то новым при разработке гироскопов с перестройкой частоты [2]. В работе предложен новый подход к синтезу широкополосного преобразователя мод с помощью оптимизации роём частиц (Particle Swarm Optimization) [4, 5]. Представлены результаты измерений параметров излучения для тестирования квазиоптических компонентов giro-ЛОВ на малом уровне мощности. Проведены эксперименты по восстановлению фазы квазиоптического линейно-поляризованного волнового пучка и измерению структуры поля на выходе Брюстеровского окна на отдельных частотах в полосе рабочих частот.

2. Постановка задачи

Пространство электронно-волнового взаимодействия квазиоптической giro-ЛОВ представляет собой зеркальную линию, размещенную в магнитном поле сверхпроводящего соленоида. Принцип работы квазиоптической giro-ЛОВ таков, что обеспечивает генерацию излучения в виде гауссова волнового пучка с линейной поляризацией. В этом случае для вывода излучения из вакуумного объема естественно применить Брюстеровское окно. Вследствие пространственных ограничений в теплом отверстии соленоида, передача генерируемого излучения из области взаимодействия к выходному вакуумному окну в основном осуществляется с помощью гофрированного волновода. Выбор диаметра волновода и параметров гофрировки

обуславливает передачу излучения в виде линейно-поляризованной моды HE11 с малыми омическими потерями и без отражений во всем диапазоне перестройки giro-ЛОВ 100-220ГГц.

Для тестирования электродинамической системы квазиоптической giro-ЛОВ на малом уровне мощности с помощью панорамного измерителя КСВН необходим широкополосный преобразователь-возбудитель моды HE11 гофрированного волновода. В данной работе представлен метод оптимизации преобразователя роением частиц в полосе частот.

2. Мода HE11 гофрированного волновода квазиоптической giro-ЛОВ

Мода HE11 гофрированного волновода обладает высоким коэффициентом связи с гауссовым волновым пучком (>98%), что существенно упрощает передачу излучения внутри квазиоптической giro-ЛОВ и вывод излучения с минимальными потерями в широкой полосе частот. Наши исследования параметров гофрировки волновода показали, что при диаметре волновода 20мм с прямоугольной гофрировкой с периодом 0,6мм, глубиной 0,5мм и шириной канавки 0,4мм достигается оптимальный уровень потерь при фиксированной структуре HE11 моды в широкой полосе частот. На рисунке 1 А) показан коэффициент связи «идеальной» моды HE11, заданной на входе в гофрированный волновод в виде Бесселевой функции, после прохождения волновода длиной 300мм в полосе рабочих частот квазиоптической giro-ЛОВ. Видно, что коэффициент связи превышает 99,5% во всей полосе частот. Коэффициент отражения не превышает -25дБ.

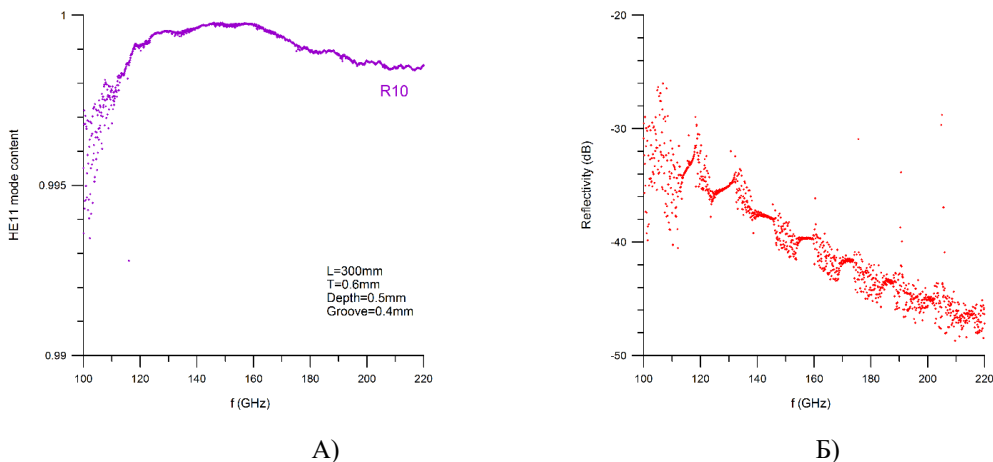


Рисунок 1. А) Содержание «идеальной» HE11 моды после прохождения 300мм секции гофрированного волновода. Б) Коэффициент отражения «идеальной» HE11 моды от 300мм секции гофрированного волновода в полосе частот квазиоптической giro-ЛОВ.

3. Волноводный преобразователь в моду HE11 гофрированного волновода

Для измерения выходной системы с Брюстеровским окном на малом уровне мощности разработан возбудитель моды HE11 гофрированного волновода диаметром 20мм. Для нахождения профилей волноводных преобразователей применяются различные методы синтеза [6]. В данной работе используется методом многомерной оптимизации роением частиц (Particle Swarm Optimization). Профиль преобразователя состоит из двух частей – гладкой и гофрированной, заданных сплайн- функциями с подвижными при оптимизации узлами (z_j , R_j) [5]. При оптимизации выполняется расчет преобразователя на отдельных частотах рабочего диапазона, а его эффективность определяется, как усредненная по выбранным частотам.

Для определения эффективности возбуждения изготовленного преобразователя проведены измерения интенсивности поля в трех поперечных сечениях Z100, Z200 и Z300мм от выхода преобразователя на частотах 140ГГц, 170ГГц и 200ГГц. Распределения поля с восстановленной фазой [7] в сечении Z100 показаны на рисунке 3.

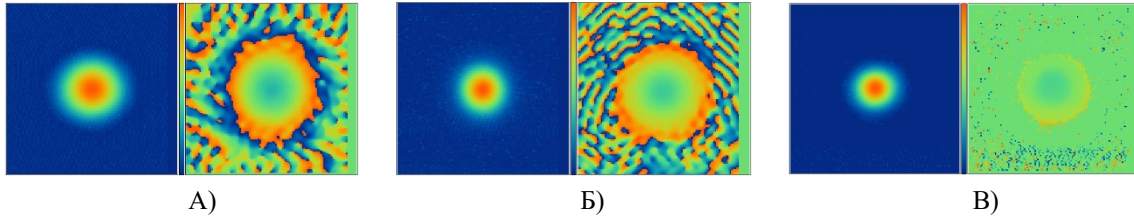


Рисунок 3. Измеренные амплитудные распределения поля в сечении Z100 с восстановленной фазой на частотах а) 140ГГц, б) 170 ГГц, в) 200ГГц. Апертура – 70x70мм², 128x128 точек.

Распределение поля на срезе рупора, вычисленное по распределениям поля с восстановленной фазой, имеют следующее содержание моды HE₁₁ гофрированного волновода Ø20 140ГГц - $\eta=95,2\%$, 170 ГГц - $\eta=98,1\%$, 200 ГГц - $\eta=96,6\%$,

4. Измерение Брюстеровских окон на малом уровне мощности

На рисунке 3 А) показан процесс измерений волнового пучка на выходе Брюстеровских окон квазиоптической гиро-ЛОВ при последовательном возбуждении каждого из каналов выходного узла. Видно, что преобразователь в моду HE₁₁ размещен вертикально. Формирование линейно-поляризованного волнового пучка на выходе гофрированного волновода диаметром 20мм для вывода излучения через каждое окно обеспечивается тройкой квазиоптических зеркал (см. рисунок 3 Б).

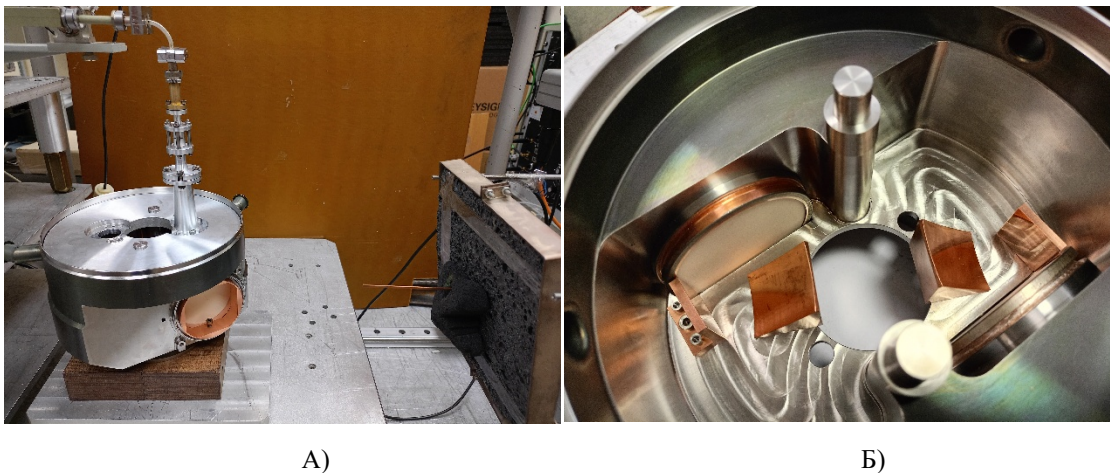


Рисунок 3. А) Измерение распределений поля на выходе Брюстеровских окон. Б) Размещение зеркал в выходном узле квазиоптической гиро-ЛОВ.

Измеренные амплитудные распределения поля линейно-поляризованного пучка на выходе Брюстеровских окон показаны на рисунке 4. Измерения полей для каждого из окон выполнены на частотах 150 ГГц, 155, 160, 165, 170, 175, 180, 185 и 190 ГГц. Видно, что несмотря на крайне ограниченное пространство вблизи оконных дисков, вывод излучения происходит с минимальными потерями в широкой полосе частот. Прямое измерение коэффициента отражения от Брюстеровского окна затрудняется из-за рассеяния и поглощения отраженного излучения корпусом выходного узла гиро-

ЛОВ, изготовленного из нержавеющей стали.

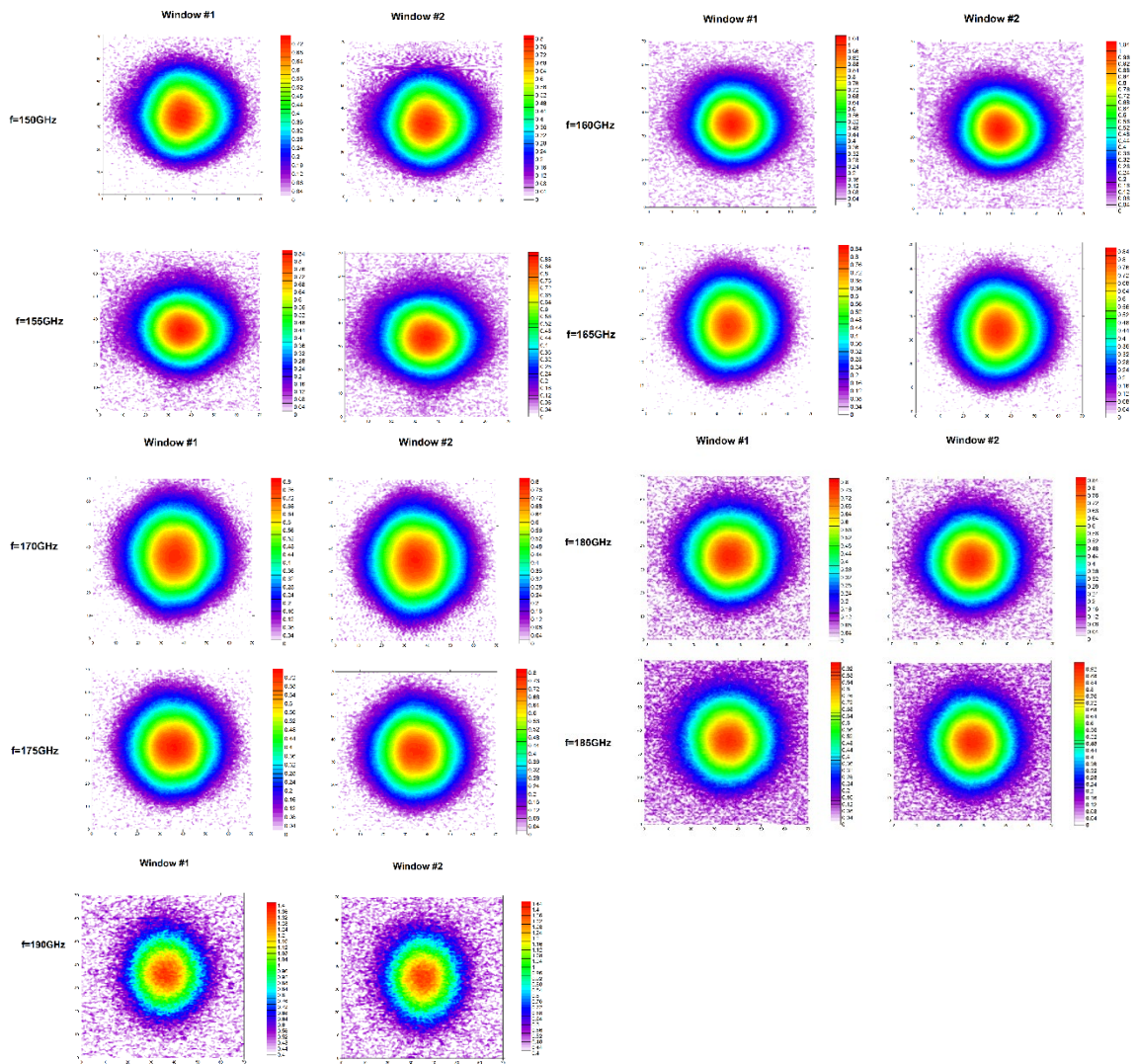


Рисунок 4. Измеренные амплитудные распределения поля на выходе Брюстеровских окон на отдельных частотах при возбуждении системы модой HE₁₁ гофрированного волновода $\varnothing 20$. Апертура – 70x70мм², 128x128 точек.

4. Заключение

В работе представлены результаты измерений выходного узла квазиоптической giro-ЛОВ с широкой перестройкой частоты излучения. Передача излучения внутри квазиоптической giro-ЛОВ из области электронно-волнового взаимодействия осуществляется в виде моды HE₁₁ гофрированного волновода (линейно-поляризованного Гауссова волнового пучка), а вывод излучения производится с помощью квазиоптических зеркал через Брюстеровское вакуумное окно. Узел обеспечивает эффективную работу квазиоптической giro-ЛОВ при перестройке в полосе частот 100-220ГГц.

Для тестирования выходного узла квазиоптической giro-ЛОВ разработан преобразователь моды прямоугольного волновода WR5 в моду HE₁₁ гофрированного волновода $\varnothing 20$ мм. Синтез профиля преобразователя выполнен одновременной оптимизацией роем частиц (Particle Swarm Optimization) на нескольких частотах. Амплитудные распределения поля на выходе преобразователя были измерены на частотах 140 ГГц, 170 и 200 ГГц в трех поперечных сечениях и использованы для

восстановления фазы волнового пучка. Показано хорошее соответствие расчетов измерениям.

С помощью разработанного преобразователя выполнены измерения структуры поля волнового пучка на выходе Брюстровских окон в полосе рабочих частот квазиоптической гиро-ЛЮВ. Показано хорошее соответствие расчетов и измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке **проекта FFUF-2022-0007**.

Список литературы

1. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Запечалов В.Е., Кошелев М.А., Третьяков М.Ю., Цветков А.И., Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред // Успехи физических наук. – 2016. – Т.186.- №6. – С.667-677.
2. Denisov G.G. et al. Multi-frequency gyrotron with BN Brewster window // Proc. of the 2006 joint 31st int. conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th Int. Conference on Terahertz Electronics. Shanghai, China. – 2006. – С.75-76.
3. Samsonov S.V., Denisov G.G., Bogdashov A.A., Gachev I.G. Cyclotron resonance maser with Zigzag quasi-optical transmission line: Concept and modeling // IEEE Trans. Electron Devices. – 2021. – Т.68.- С.5846
4. Kennedy J., Eberhart R., Particle Swarm Optimization // Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. USA. – 1995. – С.1942–1948.
5. Bogdashov A.A., Rodin Yu.V. Mode converter synthesis by the Particle Swarm Optimization // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2007. – Т. 4. – №. 28. – С.627-638.
6. Денисов Г.Г., Калынова Г.И., Соболев Д.И. Метод синтеза волноводных преобразователей // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2004. – Т.47. - №8 – С.688-694.
7. Chirkov A.V., Denisov G.G., Aleksandrov N.L. 3D wavebeam field reconstruction from intensity measurements in a few cross sections// Optics Communication. – 1995. – Т.115. – №. 5-6. – С.449-452.