

Проектирование квазиоптического преобразователя для 780 ГГц гиротрона

А.П. Гаштури, А.С. Зуев, А.П. Фокин, М.Ю. Глявин, А.Н. Куфтин

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

Аннотация: В работе рассматриваются особенности проектирования квазиоптического преобразователя для разрабатываемого в ИПФ РАН гиротрона на частоте 780 ГГц на второй гармонике гирочастоты. Преобразователь обеспечивает стандартный для гиротронов вывод излучения в поперечном к оси гиротрона направлении. Описаны ограничения, накладываемые на элементы преобразователя для гиротрона терагерцового диапазона частот. Главным элементом преобразователя является волноводный излучатель, профиль которого синтезирован методом скалярного интегрального уравнения физической оптики. Эффективность системы вывода излучения гиротрона подтверждается трехмерным моделированием с помощью решения точного векторного интегрального уравнения электрического поля.

Ключевые слова: гиротрон, квазиоптический преобразователь, интегральные уравнения, спектроскопия, терагерцовое излучение

1. Введение

Использование имеющегося с ИПФ РАН магнита JMTD-15T52 с максимальным магнитным полем 15 Тл, позволяет реализовать гиротрон с частотой 780 ГГц на второй гармоники циклотронной частоты. Излучение на этой частоте мощностью в десятки ватт востребовано в ЯМР-спектроскопии, медицинских и биологических приложениях и др. [1, 2].

Вывод генерируемого излучения с минимальными потерями одна из ключевых задач, которую приходится решать при разработке гиротрона. Для гиротрона терагерцового диапазона, особенно остро стоит вопрос с омическими потерями в резонаторе и системе вывода излучения. Кроме того, важно отвязать возможное отражение в системе вывода излучения от резонаторной области.

Открытый квазиоптический преобразователь (КОП) эффективно решает указанные проблемы. В современных гиротронах используются преобразователи со специально профилированными для рабочей моды элементами. Такой подход позволяет обеспечить крайне низкий уровень дифракционных потерь. Эффективность современных КОП достигает 98%. В данной работе представлен КОП для гиротрона на частоте 780 ГГц [3], разрабатываемого в ИПФ РАН.

2. Особенности КОП для гиротрона на частоте 780 ГГц

Построенный по традиционной для мощных гиротронов концепции, КОП для 780 ГГц гиротрона имеет ряд конструктивных особенностей. Преобразователь включает гофрированный волноводный излучатель и набор квазиоптических зеркал (Рисунок 1). Эта система транспортирует излучение рабочей моды к выходного окну и формирует из данного излучения Гауссов пучок. Центральным элементом всей системы вывода является волноводный преобразователь (излучатель) со специально синтезированным профилем внутренней поверхности. В нем происходит основное преобразование волноводной моды в гауссово-подобное распределение поля на выходе излучателя. Для рабочей моды $TE_{10,7}$ и частоты 780 ГГц при радиусе резонатора 2,07 мм был выбран радиус излучателя, равный 5 мм. Это снижает омические потери в системе

вывода энергии и упрощает изготовление излучателя. С другой стороны, радиус излучателя 5 мм соответствует низкому, около 24,5 градусам, углу Бриллюэна для преобразуемого излучения [4]. Этот аспект влияет на длину преобразователя и в данном случае, для преобразования волноводной моды в гауссово-подобное распределение поля, требуется порядка 200 мм длины излучателя.

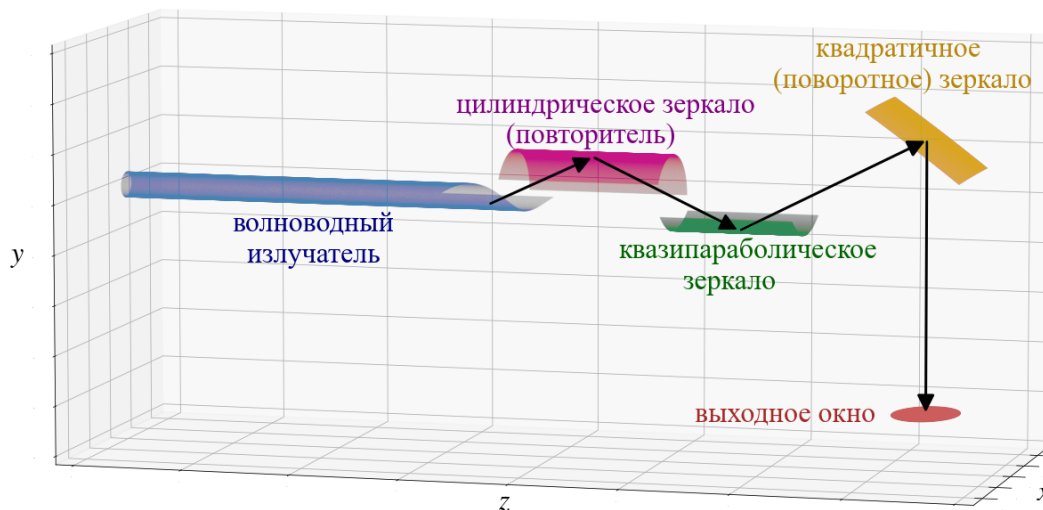


Рисунок 1. Схема квазиоптического преобразователя гиротрона на 780 ГГц. Черными стрелками указано направление распространения излучения

Новый излучатель отличается от стандартных соотношением длины и среднего радиуса. Причем наличие гофрировки на его внутренней поверхности накладывает дополнительное технологическое ограничение: для достижения требуемой точности изготовления, излучатель следует собирать из нескольких секций. Технологии производства диктует оптимальное соотношение длины секции к диаметру — пять к одному. Таким образом, излучатель должен состоять из 4х секций, 50 мм длиной каждая.

Обычно в зеркальной части большинства систем вывода излучения гиротронов используются зеркала, поверхности которых также имеют сложные неаналитические профили. Такой подход позволяет обеспечить максимальное согласование излучения на выходе излучателя и основной моды Гаусса на выходном окне гиротрона. Подобные зеркала сложны в изготовлении и юстировке и слабо применимы для гиротронов терагерцового диапазона. Поэтому, с целью упростить зеркальную часть системы вывода излучения, рассматривались зеркала аналитической формы: цилиндрический повторитель, квазипараболическое зеркало и квадратичное поворотное зеркало (см. Рисунок 1). Такие отражатели при неточности позиционирования слабо снижают эффективность преобразователя.

3. Результаты расчетов.

Для вычисления профиля излучателя, соответствующего всем описанным выше ограничениям, использовался метод на основе принципа оптимального синтеза и скалярного интегрального уравнения итерационно физической оптики (ИФО) [5]. Уравнение ИФО дает приемлемую точность для анализа электромагнитных полей в сверхразмерном волноводе, а скорость получения его решения высока (при использовании приближения геометрической оптики и быстрого преобразования Фурье). Итерационный процесс синтеза включает в себя два пересчета поля на итерацию – распространения входного излучения к выходу излучателя и обращенного целевого распределения от выхода к входному сечению. Для данного излучателя длиной более 500 длин волн, процесс расчета поверхности потребовал 50 итераций

синтеза (100 пересчетов поля). Эффективность преобразования мод для результирующего профиля составила 98,7%. На Рисунке 2 продемонстрированы профиль излучателя, а также распределение продольного магнитного поля на его поверхности. На карте профиля отмечены границы секций из которых состоит излучатель. На каждом стыке излучателя профиль имеет нулевое значение, чтобы уменьшить возможные отражения от данных областей.

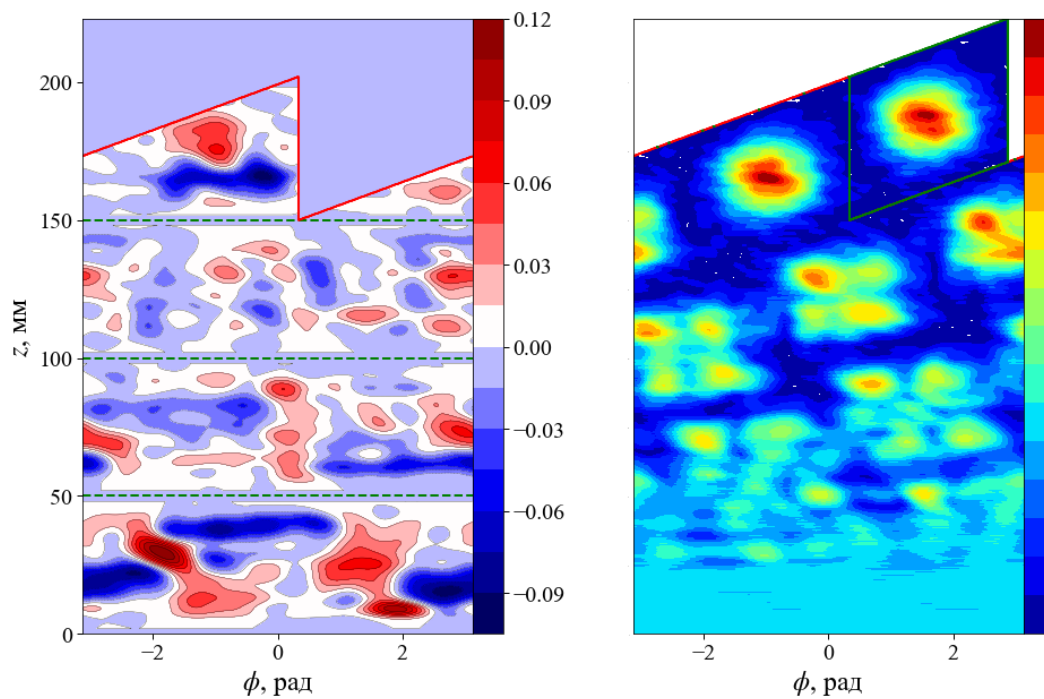


Рисунок 2. Синтезированный профиль (шкала в мм) волноводного излучателя для моды $TE_{10,7}$ на частоте 780 ГГц (слева) и соответствующие распределения амплитуды продольного магнитного поля на стенке волновода и выходной зоне Бриллюэна (справа).

Для проверки получившегося в результате быстрой процедуры синтеза профиля излучателя, был произведен проверочный расчет всего КОП с помощью решения интегрального уравнения электрического поля (EFIE, [6]). Этот метод позволяет рассчитывать векторное электромагнитное поле в трехмерных сверхразмерных системах с высокой точностью. Результат расчета EFIE подтвердил высокую эффективность всей системы вывода излучения на уровне 98%. На Рисунке 3 продемонстрировано распределение поля на выходном окне диаметром 32 мм.

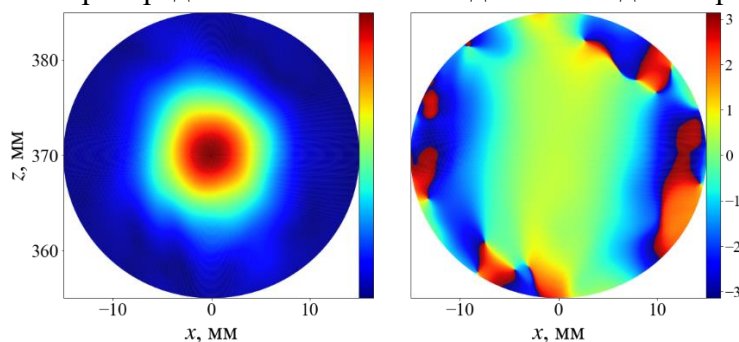


Рисунок 3. Амплитуда и фаза электрического поля на выходном окне гиротрона, рассчитанное уравнением EFIE.

4. Заключение

Разработан дизайн системы вывода излучения для гиротрона на частоте 780 ГГц. Несмотря на ряд специфических ограничений, таких как низкий угол Бриллюэна и составная конструкция излучателя, спроектированный КОП имеет высокую эффективность, что подтверждается расчетами различными методами. Данный подход может быть в дальнейшем использован в других гиротронах терагерцового диапазона. Исследование выполнено в рамках проекта ИПФ РАН **FFUF-2022-0007** «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона».

Список литературы

1. 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.
2. Blank M. et al. Millimeter-wave sources for DNP-NMR // Handbook of High Field Dynamic Nuclear Polarization. – Wiley, 2020. – С. 155-166.
3. Запевалов В.Е., Зуев А.С., Планкин О.П., Семенов Е.С. Компактный гиротрон с частотой 395 ГГц // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2025. Вып. 7. С. 194–195.
4. A. A. Bogdashov, G. G. Denisov, Asymptotic theory of high efficiency converters of higher-order waveguide modes into eigenwaves of open mirror lines // Radiophysics and Quantum Electronics, vol. 47, no. 4, pp. 283-296, Apr. 2004.
5. Гаштури А.П., Денисов Г.Г., Соболев Д.И., Радикальное ускорение метода синтеза волноводных излучателей гироприборов на основе уравнения итерационной физической оптики, Известия ВУЗов, Радиофизика, Т. 68, № 3, 2025, с. 226-230.
6. Gibson W.C., The Method of Moments in Electromagnetics // Boca Raton: CRC Press, 2021