

Высокоэффективный квазиоптический гиротронный преобразователь моды с малым углом Бриллюэна в гауссов пучок

А.П. Гаштури, Д.И. Соболев, Г.Г. Денисов

Институт Прикладной Физики им А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: Для минимизации дифракционных потерь в гиротроне используется квазиоптический преобразователь, который трансформирует собственную моду волновода круглого сечения в гауссов волновой пучок. В данной работе представлен квазиоптический преобразователь гиротрона на рабочей моде $TE_{1,2}$ с малым углом Бриллюэна, в котором генерируемое излучение меняет свой угловой спектр уже в первом элементе преобразователя – волноводном излучателе. Попутно, в том же излучателе электромагнитное поле группируется в готовый для дальнейшей транспортировки гауссов пучок с высокой эффективностью.

Ключевые слова: СВЧ, гиротрон, квазиоптика

1. Введение

Гиротрон – генератор микроволнового излучения большой мощности, способный генерировать более мегаватта СВЧ мощности в непрерывном режиме. Для подобных систем важным аспектом их работоспособности является минимизация дифракционных потерь полученного излучения при его высвечивании и дальнейшей транспортировке. Для решения этой задачи в гиротроне применяется квазиоптический преобразователь, состоящий из волноводного излучателя и нескольких зеркал. Данная работа посвящена проблеме конструирования преобразователя для случая, когда необходимо произвести изменение геометрооптических параметров моды волновода (угол Бриллюэна, радиус каустики волноводной моды) еще внутри излучателя, для получения максимально эффективной трансформации в гауссовый пучок и при этом обеспечить приемлемые размеры системы.

Метод проектирования преобразователя основан на комбинации процедуры оптимального синтеза и метода интегрального уравнения EFIE. Данный метод показывает себя как весьма эффективный инструмент для решения задач анализа излучения в открытых сверхразмерных системах и синтеза подобных систем.

2. Постановка задачи

В состав волноводного преобразователя гиротрона входит волноводный излучатель - отрезок волновода со срезом специальной формы, квазиоптическое зеркало для отражения расходящегося по азимуту излучения и превращения его в параксиальный волновой пучок, а так же одно или несколько поворотных зеркал.

Для описания принципа проектирования геометрии волноводного излучателя удобно переходить к лучевому представлению [1]. Волноводная мода $TE_{m,p}$ может быть представлена как непрерывный поток лучей, распространяющихся внутри волновода и переотражающихся от его стенок. Все лучи одной моды имеют угол между направлением их распространения и осью волновода – угол Бриллюэна $\varphi_B = \arcsin\left(\frac{k_{\perp}}{k}\right)$, где $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число, $k_{\perp} = \frac{v_{mp}}{R_w}$ – поперечное волновое число, v_{mp} – p -ый корень производной функции Бесселя m -ого порядка и R_w – радиус волновода.

Все лучи, переотражаясь, касаются цилиндрической поверхности – каустики с радиусом $R_c = \frac{R_w \cdot m}{v_{mp}}$. Зона Бриллюэна (ЗБ) – область боковой поверхности волновода, на которую «падают» все лучи, образующие моду (Рис. 1), а вся поверхность волновода получается «замощением» этими зонами. Удалив из стенки лишь одну ЗБ, можно обеспечить высвечивание всех лучей, следовательно, можно удалить и все последующие зоны. Удаление этих зон обуславливает форму среза волноводного излучателя. Выбор формы ЗБ произволен, но он влияет на ширину углового распределения по азимуту выходящих наружу волновода лучей, поэтому обычно выбирают в качестве ЗБ область, ограниченную по азимуту углами между двумя последовательными отражениями одного луча, а по длине – шагу винтовой траектории этого луча (Рисунок 1).

Если использовать излучатель с недеформированной боковой поверхностью, то его эффективность составит максимум 80%, остальное составят дифракционные потери, поэтому стараются подобрать (аналитически или с помощью специальных методов синтеза) форму поверхности излучателя таким образом, чтобы сгруппировать изначально однородное поле на стенке в распределение, локализованное в рамках выходной ЗБ, близкое к гауссовому. Для мод с углами Бриллюэна 40° - 60° разумнее всего сделать такую группировку поля, с сохранением углового распределения близкого к первоначальному в моде. В таком случае достаточно неглубокой гофрировки, чтобы на небольшой длине (3-5 отражений луча от поверхности излучателя) получить высокую эффективность излучателя.

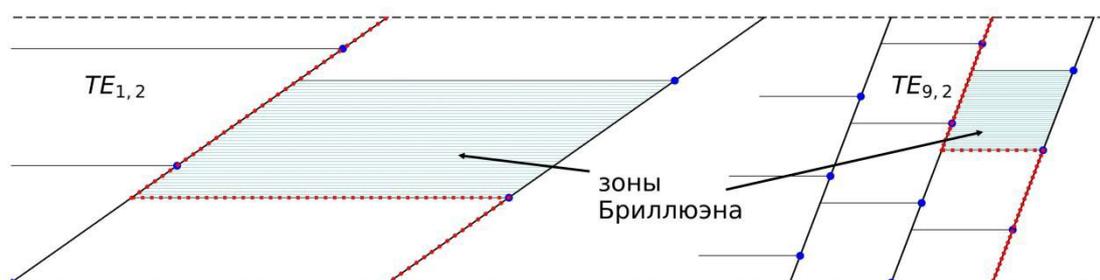


Рисунок 1. Сравнительное изображение ЗБ мод $TE_{1,2}$ и $TE_{9,2}$ на развертке боковой поверхности волновода.

В новом технологическом гиротроне, работающем на частоте 28 ГГц и моде $TE_{-1,2}$ [2], коллектор расположен до выходного преобразователя. Из-за необходимости рассеяния большой мощности радиус волновода в области коллектора значительно больше, чем в области резонатора – 33 мм и 9 мм соответственно. Как следствие, на выходе гиротрона рабочая мода имеет малый угол Бриллюэна – всего 16° . Угловой спектр по азимуту из-за низкого азимутального индекса составляет 160° . При традиционной геометрии волноводного излучателя это приводит к слишком большой длине среза излучателя (515 мм), а также размерам квазиоптического и последующих зеркал. Учитывая длину волновода до среза, необходимую для профилирования и формирование сгруппированного поля на выходе излучателя, общая длина всей системы составит 1,5-2 м. К тому же, большая длина пути волнового пучка в открытой линии передач на данной, относительно низкой, частоте приведет к дополнительным дифракционным потерям.

Для решения данной проблемы было решено сделать волноводный излучатель, существенно меняющий угловой спектр, что делает его более эффективным с точки зрения дальнейшей передачи и минимизации размеров открытой части

преобразователя. За основу для угловых параметров выходного излучения были взяты таковые у моды $TE_{9,2}$ (угол Бриллюэна равен 52° , угловой спектр по азимуту 108° , а длина винтового среза 138 мм). Если синтезировать профиль поверхности волновода, преобразующий моду $TE_{-1,2}$ в волну, близкую к моде $TE_{9,2}$, то можно получить излучатель с более выгодными параметрами для высвечивания поля.

3. Метод синтеза

Метод синтеза основан на комбинации принципа оптимального синтеза [3] и метода решения уравнения EFIE [4, 5].

Итерационная процедура синтеза включает в себя пересчет входной моды, распространяющейся от входа к выходу преобразователя, и пересчет обращенного выходного распределения поля, распространяющегося от выхода к входу. На основе произведения поверхностных распределений полей этих двух расчетов формируется результирующая поправка на профиль поверхности преобразователя.

Для осуществления быстрого расчета полей в данной открытой сверхразмерной системе используется решение интегрального уравнения EFIE, которое можно записать в виде

$$\hat{t} \cdot \vec{E}^{ext}(\vec{r}) = \frac{k}{ic} \hat{t} \cdot \int_S \left(1 - \frac{\nabla \nabla'}{k^2}\right) G(\vec{r}, \vec{r}') \vec{j}_c(r') dS', \quad (1)$$

где $G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$, $\vec{j}_c(r')$ – искомая функция распределения поверхностного тока на поверхности металла (в нашем случае внутренняя поверхность волновода), \hat{t} – единичный тангенциальный вектор, а \vec{E}^{ext} – поле падающего на поверхность излучения, создаваемое сторонними источниками. В нашем случае, такими источниками являются электрические и магнитные токи, расположенные на входных (для прямого пересчета) и выходных (для обратного) поверхностях и соответствующие распределениям магнитного и электрического полей на них.

С помощью метода моментов интегральное уравнение преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений, решаемую итерационно. Для максимального ускорения поиска решения используют алгоритм многоуровневого быстрого мультипольного разложения (Multilevel Fast Multipole Algorithm – MLFMA), что снижает затраты вычислительных ресурсов с $O(N^2)$ до $O(N \log N)$ на итерацию. В такой реализации СЛАУ размерности 10^5 решается за несколько минут на персональном ПК (расчеты производились на ПК с ЦПУ Intel Core i5-10400). Решение уравнения представляет собой распределение поверхностного тока, из которого могут быть однозначно выражены компоненты полей, необходимые для расчета деформации поверхности в процедуре синтеза.

4. Результаты расчета

Подобрав моду, на которую следует ориентироваться для запуска процедуры синтеза, можно оценить длину волноводного излучателя до начала излучающего среза как 400-600 мм. На этой длине лучи, образующие входную моду, 2-3 раза отражаются от поверхности, через которую осуществляется взаимодействие с целевым обращенным выходным распределением поля.

Поля на выходе излучателя можно задавать различными способами. Можно задать поле на выходной зоне Бриллюэна – цилиндрической поверхности, продолжающей стенку волновода. Однако, после дальнейшего отражения от квазипараболического зеркала, распределение сильно меняет форму и симметрию, поэтому приходится прибегать к использованию зеркал сложной неаналитической формы. Такие зеркала очень требовательны к точности позиционирования и изготовления.

В нашем случае мы выбрали в качестве целевого распределения симметричный гауссов пучок с плоским фазовым фронтом, задав его на поверхности, близкой к поверхности плоской фазы излучения моды $TE_{9,2}$ после отражения от квазипараболического зеркала. Таким образом, можно наилучшим образом согласовать с последующими квадратичными зеркалами, без необходимости прибегать к зеркалам сложной формы, что значительно упростит юстировку всей системы в конечном устройстве.

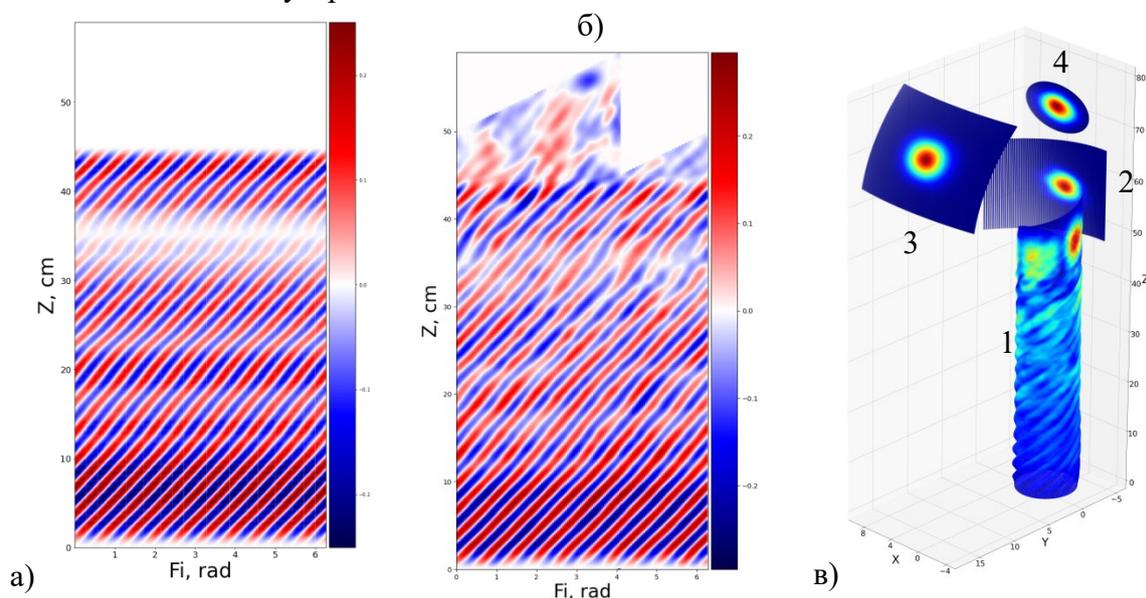


Рисунок 2. а) профиль излучателя на старте процедуры синтеза; б) профиль излучателя после синтеза; в) распределение интенсивности электромагнитного поля на поверхностях преобразователя (1 – волноводный излучатель, 2 – квазипараболическое зеркало, 3 – поворотное квадратичное зеркало) и на входе в волноводный тракт (4).

Процедура синтеза может быть ускорена удачным выбором начального профиля волновода. В качестве такого приближения мы взяли профиль волноводного преобразователя мод $TE_{-1,2}$ - $TE_{9,2}$ длиной 450 мм и эффективностью преобразования приблизительно 92% (Рисунок 2а). К данному волноводу пристыковывается винтовой срез, соответствующий моде $TE_{9,2}$. Стартовая эффективность преобразования составляет 76%. После 50 итераций процедуры синтеза результирующий профиль (Рис. 2б) обеспечивает эффективность преобразования в гауссов пучок 99% после прохождения квазипараболического зеркала. Общая длина всего преобразователя составила около 800 мм. На Рисунке 2в изображены распределения мощности электромагнитного поля на поверхностях преобразователя, а также на входе в гофрированный волновод, предназначенный для дальнейшей транспортировки СВЧ излучения.

5. Заключение

Высокоэффективный преобразователь для гиротрона на моде с малым углом Бриллюэна построен с помощью комбинированного метода синтеза. Сложная форма излучателя преобразует не только амплитудное распределение поля на его стенке, но также угловые характеристики распространения излучения, что позволяет добиться не только высокой эффективности передачи СВЧ энергии, но и уменьшить размер преобразователя, длины трассы распространения излучения в зеркальном тракте, а, следовательно, минимизировать дифракционные потери во всей системе. Эффективность преобразователя подтверждена различными методами расчета. В

данный момент, преобразователь находится в производстве.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов **ИПФ РАН FFUF-2021-0001, FFUF-2022-0007.**

Список литературы

1. A. A. Bogdashov and G. G. Denisov, Asymptotic theory of high efficiency converters of higher-order waveguide modes into eigenwaves of open mirror lines //Radiophys. Quantum Electron., 47, No. 4, pp 283-296 (2004).
2. Mikhail D. Proyavin, Mikhail V. Morozkin et al, Results of the Study of a New Generation Technological Gyrotron System With High Power and Efficiency //IEEE Electron Device Letters (Volume: 44, Issue: 1, January 2023), pp 148 - 151
3. D.I. Sobolev, G.G. Denisov, Principles of Synthesis of Multimode Waveguide Units //IEEE Trans.Plasma Science, Vol. 38 ,no 10, pp. 2825 – 2830, Oct. 2010.
4. Chew W., Jin J., Michielssen E. and Song J., Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics - Artech House, 2001.
5. А. П. Гаштури, Д. И. Соболев, Анализ сверхразмерных электродинамических систем комбинированным методом на основе принципа физической оптики и метода мультипольного разложения //Известия ВУЗов, Радиофизика. Том LXV, № 5-6, 2022. сс 484-493.