

*Мишакин С.В., Самсонов С.В., Соболев Д.И.,
Гаишури А.П., Денисов Г.Г.
Институт прикладной физики РАН*

Система ввода/вывода излучения мощной широкополосной гиро-ЛБВ W-диапазона на третьей циклотронной гармонике

Система ввода/вывода излучения играет одну из ключевых ролей при разработке усилителей миллиметрового диапазона длин волн. Успех реализации гиро-ЛБВ во многом определяется успехом реализации системы ввода/вывода излучения. В работе предложена и численно исследована схема ввода/вывода излучения мощной широкополосной гиро-ЛБВ диапазона частот 95 ГГц с низким рабочим магнитным полем, не содержащая низкомодовых волноводных компонент и позволяющая использовать одно барьерное окно на выходе системы как для ввода, так и для вывода излучения.

Ключевые слова: микроволновый усилитель, гиро-ЛБВ, ввод/вывод сигнала.

Создание источников мощного микроволнового излучения в миллиметровом и субмиллиметровом частотных диапазонах является актуальной задачей современной физики и техники. Одной из разновидностей востребованных источников такого рода являются широкополосные усилители с высокой средней и/или непрерывной мощностью. В связи с конкретными задачами (увеличение разрешающей способности, ширины канала передачи данных и т.д.) основными направлениями развития усилителей миллиметрового диапазона частот являются увеличение их рабочей частоты, мощности и расширение полосы усиления. В настоящее время единственным типом устройств, способным обеспечить необходимые параметры излучения для ряда уникальных приложений, таких как, например, системы радиовидения большой дальности и высокого разрешения, являются гиротронные лампы бегущей волны (гиро-ЛБВ).

В течение ряда лет, в ИПФ РАН активно развивается разновидность гиро-ЛБВ с пространством взаимодействия в виде волновода с винтовой гофрировкой поверхности. В настоящее время создано несколько устройств данного типа в 8-мм диапазоне длин волн [1] и ведутся активные исследования, направленные на их продвижение в более коротковолновые диапазоны. В частности, развивается проект гиро-ЛБВ диапазона частот 95 ГГц, в которой взаимодействие электронного пучка и волны происходит на третьей гармонике циклотронной частоты. Работа на третьей циклотронной гармонике требует рабочего магнитного поля с умеренной индукцией 1.3 Тл, для создания которого может быть использован «теплый» соленоид с достаточно низким энергопотреблением. Согласно проведённому моделированию [2], предложенная гиро-ЛБВ обеспечивает мощность 80 кВт, усиление 25 дБ (в максимуме полосы усиления), при ширине полосы около 6%.

Традиционно в гиро-ЛБВ используется узел ввода излучения на катодном конце системы, состоящий преимущественно из низкомодовых волноводных элементов, что является серьёзным препятствием при продвижении в более коротковолновые частотные диапазоны. Сравнительно недавно была предложена и реализована в эксперименте с 8-мм гиро-ЛБВ на второй гармонике циклотронной частоты [3] схема, в которой как вывод, так и ввод излучения осуществляются через одно барьерное окно на выходе лампы.

Для гиро-ЛБВ на третьей гармонике существенным отличием от конфигурации гиро-ЛБВ на второй гармонике является то, что для ввода/вывода излучения в винтовую структуру пространства взаимодействия используется мода $TE_{2,1}$ (вместо моды $TE_{1,1}$).

Данная особенность приводит к тому, что предложенная ранее схема требует существенной модификации.

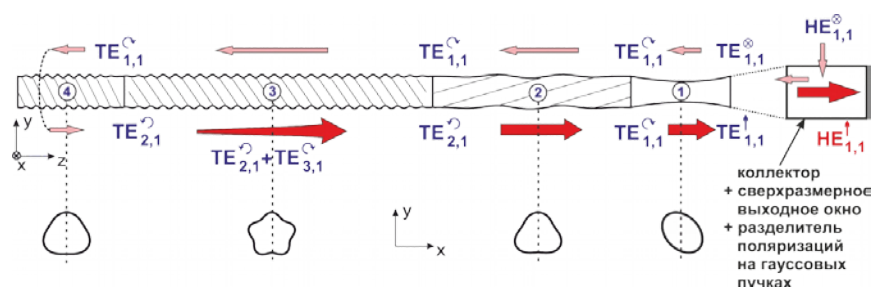


Рис. 1. Схема ввода/вывода излучения gyro-ЛБВ на третьей гармонике.

Кратко система ввода/вывода излучения gyro-ЛБВ на третьей гармонике гирочастоты может быть описана следующей последовательностью шагов (см. рис. 1):

- * Линейно поляризованная волна $TE_{1,1}$ (вдоль оси x) проходит через поляризатор (1) и преобразуется в циркулярно-поляризованную волну $TE_{1,1}$ левого вращения;
- * $TE_{1,1}$ левого вращения проходит без существенного рассеяния через выходной преобразователь (2) и через пространство взаимодействия gyro-ЛБВ (3);
- * $TE_{1,1}$ левого вращения преобразуется во встречную волну $TE_{2,1}$ левого вращения в брэгговском отражателе/преобразователе (4) (на встречных волнах);
- * $TE_{2,1}$ левого вращения усиливается в пространстве взаимодействия gyro-ЛБВ (3);
- * $TE_{2,1}$ левого вращения преобразуется в $TE_{1,1}$ правого вращения в выходном преобразователе (2) (на попутных волнах);
- * $TE_{1,1}$ правого вращения преобразуется в линейно поляризованную $TE_{1,1}$ (вдоль оси y) после прохождения поляризатора(1);

Ниже каждый из волноводных элементов исследуется отдельно на основе универсального трёхмерного расчёта; на конечном этапе приводятся результаты моделирования всей системы целиком.

1. Поляризатор

Основной задачей поляризатора является преобразование линейно поляризованной моды в циркулярно-поляризованную и обратно. Внутренняя поверхность поляризатора образована пересечением двух поверхностей: двух конусов, расположенных навстречу друг другу и поверхностью, образованная линией, параллельной оси, описывающей эллипс. Особенностью данного поляризатора является его относительная сверхразмерность и многомодовость – в рабочем диапазоне частот помимо волны $TE_{1,1}$ также распространяется мода $TM_{1,1}$. В результате оптимизации были получены параметры, обеспечивающие высокую эффективность преобразования в рабочей полосе частот (рис. 2).

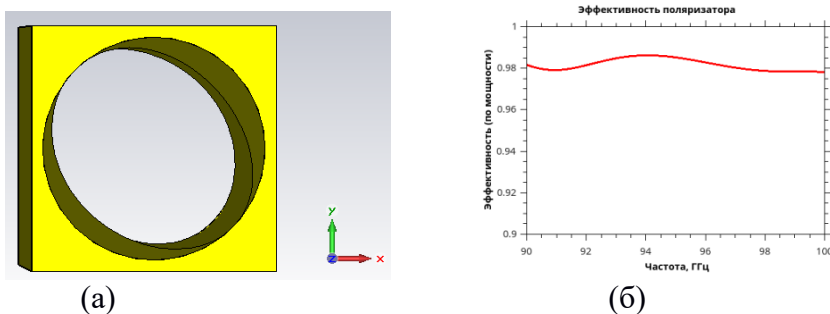


Рис. 2. Поперечные сечения поляризатора (а), (б) эффективность (по мощности) преобразования линейно-поляризованного излучения моды $TE_{1,1}$ в циркулярно-поляризованное.

2. Волноводный преобразователь на выходе системы

Волноводный преобразователь на выходе системы ((2) на рис. 1) должен отвечать двум требованиям: пропускать без рассеяния моду $TE_{1,1}$ левого вращения, распространяющуюся справа налево (входное излучение) и эффективно преобразовывать моду $TE_{2,1}$ левого вращения, распространяющуюся слева направо (выходное излучение), в моду $TE_{1,1}$ правого вращения.

При разработке данного преобразователя использовалась итерационная процедура синтеза. За счёт профиля, в котором амплитуда и фаза гофрировки являлись функциями продольной координаты, была найдена конфигурация преобразователя, обеспечивающая необходимые характеристики (рис. 3).

3. Рефлектор-преобразователь на катодном конце системы

Целью данного преобразователя является эффективное преобразование моды $TE_{1,1}$ левого вращения, распространяющейся справа налево, во встречную волну $TE_{2,1}$ также левого вращения (рис. 4а).

В силу относительно небольшой сверхразмерности данного преобразователя, конфигурация с регулярной винтовой гофрировкой и линейными сходами на средний радиус оказывается достаточной для обеспечения необходимой эффективности преобразователя (рис. 4б).

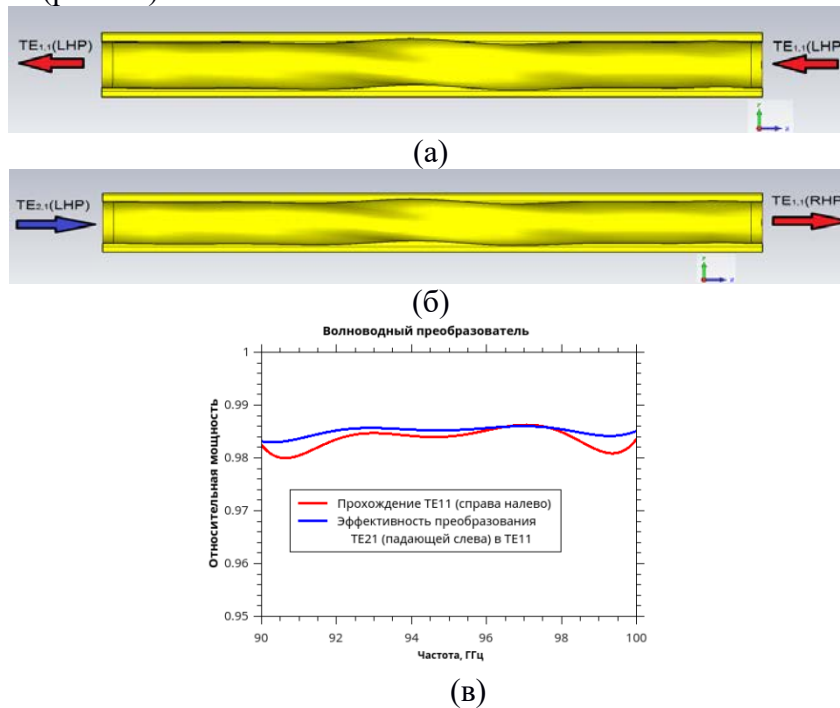


Рис. 3. Выходной волноводный преобразователь: (а, б) поперечное сечение, (в) эффективность.

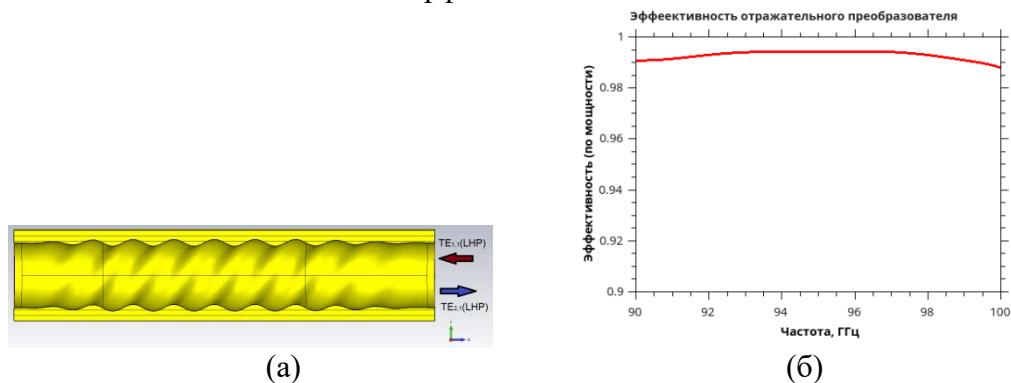


Рис. 4. Волноводный преобразователь-рефлектор на катодном конце системы: (а) продольное сечение, (б) эффективность преобразования.

4. Система ввода в целом

После оптимизации отдельные компоненты были соединены в общую систему. Кроме перечисленных выше волноводных компонент в систему были также добавлены согласующие конусы (рис. 5).

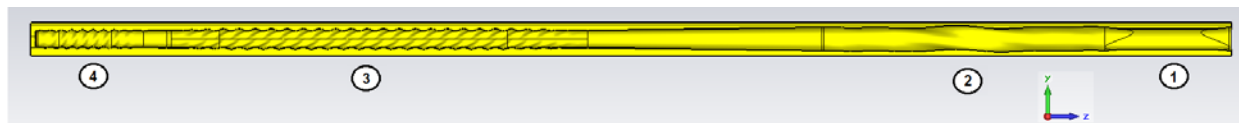


Рис. 5. Продольное сечение системы ввода/вывода в целом

К системе ввода в целом выдвигается несколько требований. В частности, система должна обеспечивать высокую эффективность ввода/вывода излучения (рис. 6а), а также обеспечивать хорошую развязку потоков входного и выходного излучения, в частности «просачивание» выходной мощности в излучение с перпендикулярной поляризацией (входное излучение) должно быть минимально (рис. 6). Согласно 3D расчётам оба эти условия выполнены.

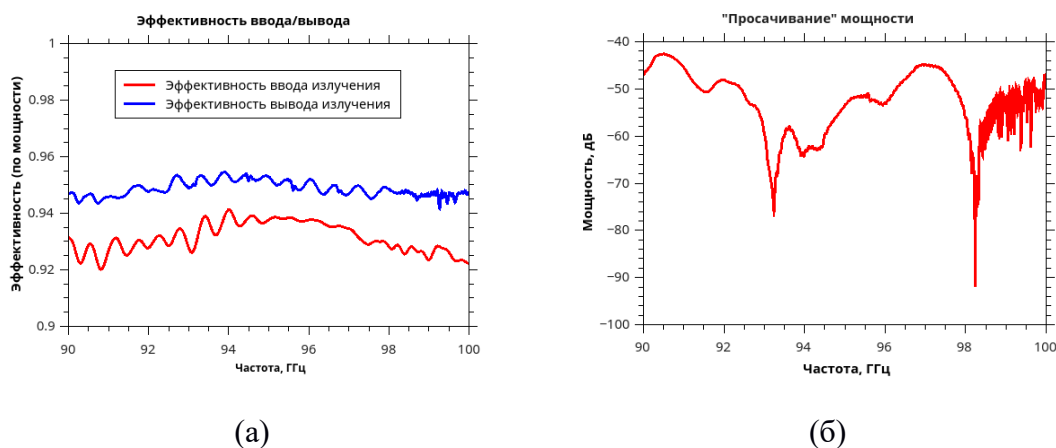


Рис. 6. Эффективность системы ввода/вывода излучения: (а) Эффективность ввода/вывода, (б) «просачивание» выходной мощности во входной порт (на вход маломощного источника)

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-38-20874.

Библиографический список

1. S.V. Samsonov, I.G. Gachev, G.G. Denisov, A.A. Bogdashov, S.V. Mishakin, A.S. Fiks, E.A. Soluyanov, E.M. Tai, Y.V. Dominyuk, B.A. Levitan, V.N. Murzin Ka-band Gyrotron Traveling-Wave Tubes with the Highest Continuous-Wave and Average Power, // IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, vol.61, no.12, pp.4264-4268.
2. S.V. Mishakin, S.V. Samsonov, G.G. Denisov, "A Helical-Waveguide Gyro-TWT at the Third Cyclotron Harmonic," // IEEE Transactions on Electron Devices, vol.62, no.10, pp.3387-3392, Oct. 2015
3. S.V. Samsonov, A.A. Bogdashov, I.G. Gachev, G.G. Denisov, and S.V. Mishakin "Proof-of-Principle Experiment on High-Power Gyrotron Traveling-Wave Tube with a Microwave System for Driving and Extracting Power Through One Window.," // IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 26, issue 4, pp. 288-290. April 2016.