

Широкополосные волноводные преобразователи Ka-диапазона, выполненные металлизацией 3D-печатных фотополимерных структур

Д.И. Соболев, М.Д. Проявин, В.Ю. Заславский, В.Е. Котомина

Институт Прикладной Физики РАН

Аннотация: предложены варианты синтезированных эффективных широкополосных волноводных преобразователей моды H_{10} прямоугольного волновода в моду E_{01} сверхразмерного круглого волновода. Расчетная эффективность преобразователей составляет более 95% в диапазоне частот 34-40 ГГц. Для измерений на малом уровне мощности прототипы были напечатаны на 3D-принтере из фотополимера с последующим химическим покрытием поверхности слоем меди. По результатам измерений преобразователи имеют низкий уровень омических потерь, а эффективность преобразования близка к расчетной.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, многомодовые волноводы, волноводные преобразователи, аддитивные технологии

1. Введение

В последние годы был достигнут значительный прогресс в развитии доступных методов быстрого прототипирования, особенно технологий 3D-печати. Широкое распространение LCD-матриц высокого разрешения привело к тому, что минимальный размер элемента даже для бытовых фотополимерных принтеров достиг 20 мкм по всем координатам. При решении сопутствующих технологических проблем это позволяет изготавливать диэлектрические компоненты с субволновыми элементами сложной формы, работающие на частотах до сотен ГГц [1,2]. Металлизация поверхности напечатанных компонентов позволяет использовать их для замены изготовленных традиционными методами чисто металлических элементов, в том преобразователей мод металлического волновода. В данной работе рассматриваются преобразователи в моду E_{01} круглого сверхразмерного волновода, использующуюся, в частности, для возбуждения цилиндрических брэгговских структур.

2. Синтезированный волноводный преобразователь моды H_{01} прямоугольного одномодового волновода в моду E_{01} сверхразмерного круглого волновода

Рассматриваемая мода E_{01} круглого волновода широко использовалась в различных приложениях и ранее, поэтому существует множество вариантов преобразователей, например, описанные в [3]. Тем не менее, использование современных методов анализа электромагнитных полей и синтеза геометрии волноводов позволяет существенно улучшить характеристики. Для синтеза использовался ранее разработанный итерационный метод оптимизации формы поверхности для достижения максимального преобразования одного заданного распределения электромагнитного поля в другое, описанный в [4].

На каждой итерации рассматриваются два распределения электромагнитных полей, рассчитанные каким-либо методом анализа внутри системы, состоящей из входного сечения S_1 , выходного сечения S_2 и проводящей стенки волновода до итерации S_0 (Рис. 1). Для первого расчета используется граничное условие на входе –

заданные входные электрическое и магнитное поля E_1 и H_1 , соответственно. Зависимость от времени принимается равной $e^{-i\omega t}$. Во втором расчете в качестве граничного условия используются требуемые выходные поля, развернутые в пространстве E_{-2} и H_{-2} (зависимость выглядит как $\vec{E}_{-2} = \vec{E}_2^*$, $\vec{H}_{-2} = -\vec{H}_2^*$, где звездочка означает комплексное сопряжение).

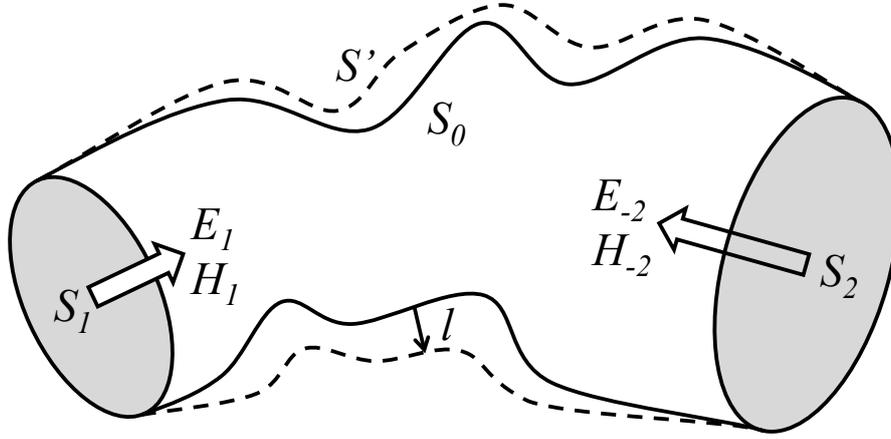


Рисунок 1. Схема процедуры синтеза: Входное и выходное сечения волновода S_1 и S_2 , стенка волновода до итерации синтеза S_0 и после S' , значение деформации l в произвольной точке поверхности волновода, входное электрическое и магнитное поля E_1, H_1 и обращенные выходные поля E_{-2}, H_{-2} .

Если обозначить поверхность стенки волновода после итерации за S' , то расстояние между ней и поверхностью S_0 будет значением деформации в данной точке l . При условии, что за одну m -тую итерацию поверхность стенки волновода деформируется плавно, а величина l в каждой точке поверхности много меньше длины волны излучения, то можно выразить связь функции деформации поверхности с изменением эффективности преобразования ΔP , которая выглядит как:

$$\Delta P = P_{m+1} - P_m = \int_{S_0} l F dS, \quad (1.1)$$

$$P = \int_{S_2} ([\vec{E}_1 \times \vec{H}_{-2}] - [\vec{E}_{-2} \times \vec{H}_1]) \vec{n} dS \quad (1.2)$$

$$F = -ik(\vec{H}_{\tau 1} \vec{H}_{\tau -2} + \vec{E}_{n1} \vec{E}_{n-2}) \quad (1.3)$$

Для заданного изменения эффективности преобразования за итерацию минимальную среднеквадратичную норму имеет функция деформации стенки волновода, выражающаяся как

$$l = \alpha \text{Re} F + \beta \text{Im} F, \quad (2)$$

где постоянные коэффициенты α и β линейно зависят от ΔP и поверхностных интегралов функции F . При синтезе компонентов, от которых требуется высокая эффективность в диапазоне частот, значения деформации поверхности вычисляются для нескольких значений частоты и впоследствии суммируются с весовыми коэффициентами.

Поскольку в данном случае отсутствуют требования на соосность входного и выходного сечений и даже на параллельность их осей, в процессе синтеза можно допустить перемещение входного и выходного сечений, а также их поворот на

произвольный угол, но не изменение размера. Основным требованием является максимизация эффективности в частотной полосе 34-40 ГГц при выходном диаметре волновода 20 мм. Синтезированная поверхность преобразователя изображена на Рис. 2. Угол между осями входного и выходного сечения составил приблизительно 34.5 градуса.

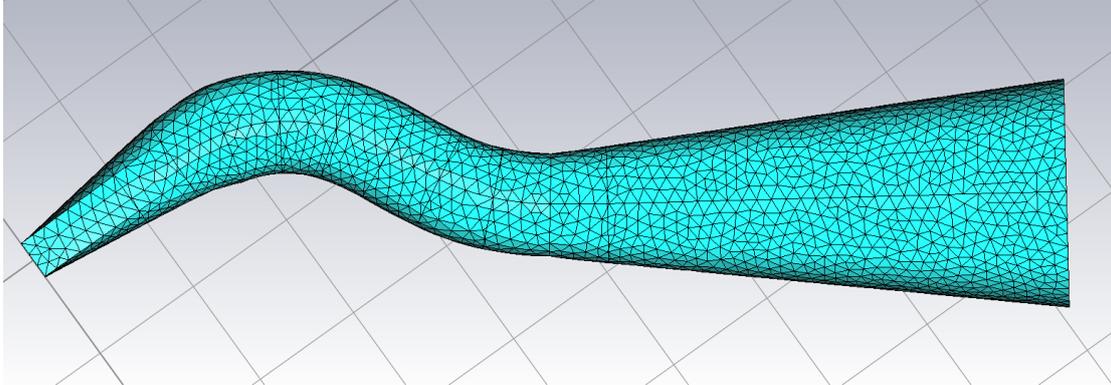


Рисунок 2. Синтезированная поверхность широкополосного волноводного преобразователя моды H_{10} прямоугольного волновода в моду E_{01} круглого волновода.

Для проверки результатов синтеза геометрия поверхности была просчитана в CST Studio Suite, при этом для сравнения были получены характеристики как для случая идеально проводящих стенок, так и для стенок из бескислородной меди при нулевом значении шероховатости поверхности. Из-за технических ограничений пакета CST Studio (волноводные порты обязаны быть параллельны координатным плоскостям) к преобразователю был присоединен сегмент изогнутого одномодового волновода, в случае медной стенки имеющий потери около 0.01 дБ. Структура электрического поля в преобразователе показана на Рис. 3.

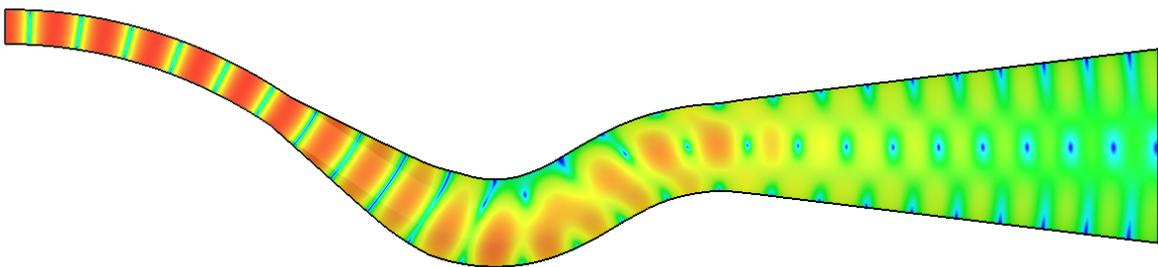


Рисунок 3. Структура электрического поля в продольном сечении широкополосного волноводного преобразователя моды H_{10} прямоугольного волновода в моду E_{01} круглого волновода радиусом 10 мм на частоте 36 ГГц.

Рассчитанные в CST Studio Suite значения эффективности преобразователя показаны на Рис. 4. Отражение во всем частотном диапазоне не превысило -20 дБ. Для сравнения показана также характеристика более длинного преобразователя с параллельными входным и выходным сечениями, состоящего из отдельных сегментов, последовательно преобразующих моду H_{01} прямоугольного волновода в моду H_{11} круглого волновода, затем в моду E_{01} малого радиуса, а затем рупора, сохраняющего моду E_{01} при увеличении радиуса. Из графиков видно, что омические потери в медных стенках составляют 0.05 дБ и практически не зависят от частоты. С учетом поправки на потери в участке одномодового изогнутого волновода уровень омических потерь уменьшается до 0.04 дБ.

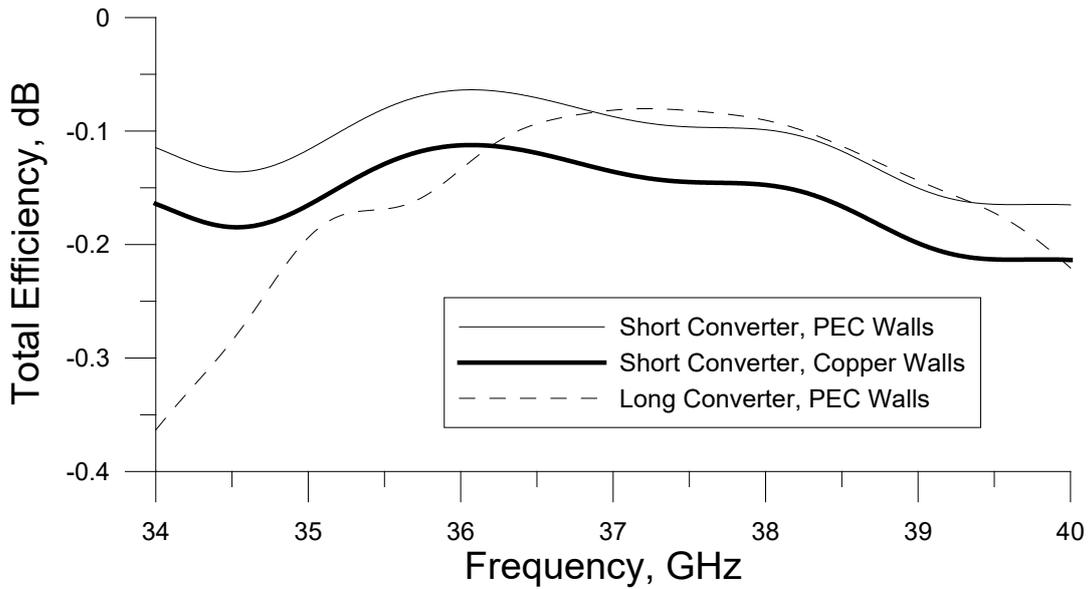


Рисунок 4. Полные расчетные потери в преобразователях в моду E_{01} : тонкая сплошная линия – синтезированный широкополосный преобразователь со стенками из идеального проводника; толстая сплошная линия – синтезированный широкополосный преобразователь со стенками из меди; прерывистая линия – более длинный преобразователь со стенками из идеального проводника.

3. Изготовление и экспериментальная проверка преобразователей

Для изготовления преобразователей они были разделены на две половины в продольной плоскости, что не вносит существенных потерь из-за отсутствия в данной конфигурации токов через границу раздела. Части преобразователей были напечатаны на фотополимерном 3D-принтере с разрешением 40 мкм и химически покрыты слоем меди не менее 10 мкм, что много больше толщины скин-слоя в рабочем диапазоне частот. Внешний вид 3D-модели и собранные для измерений преобразователи показаны на Рис. 5.



Рисунок 5. а) модель половины преобразователя в моду E_{01} для 3D-печати; б) собранные для измерений преобразователи.

Для измерений два преобразователя были соединены навстречу друг другу, как показано на Рис. 5б. По результатам измерений на векторном анализаторе цепей потери в одном преобразователе превышают уровень, соответствующий гладким стенкам из бескислородной меди, примерно на 0.1 дБ, что является приемлемым уровнем для абсолютного большинства приложений. Для сравнения конфигурация, соответствующая измеренной была также просчитана в CST Studio Suite. Результаты расчетов и измерений представлены на Рис. 6.

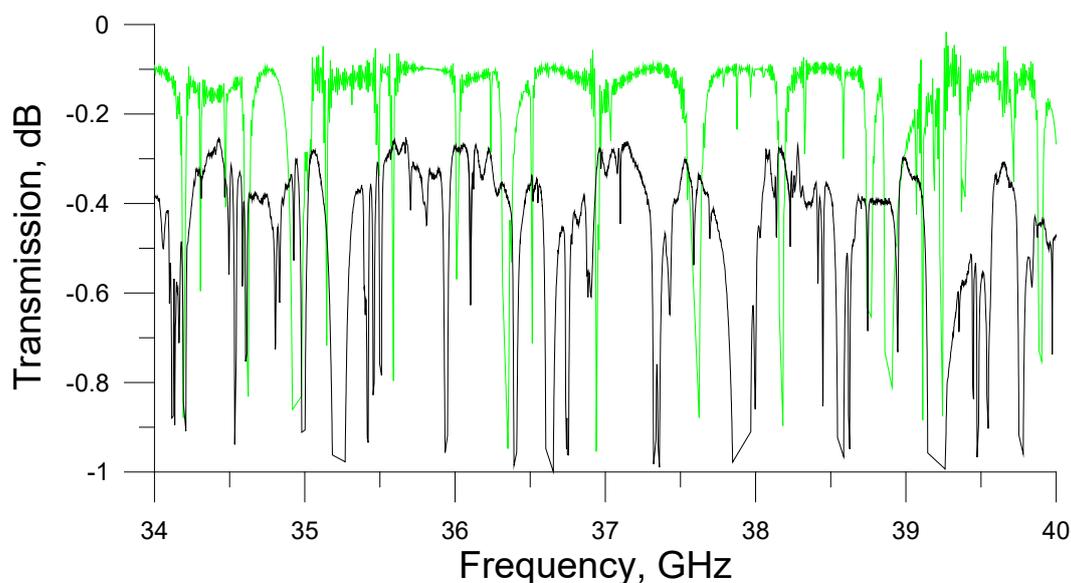


Рисунок 6. Зеленый график – расчетные потери системы из двух соединенных навстречу преобразователей в моду E_{01} сверхразмерного круглого волновода; черный график – измеренное на векторном анализаторе цепей прохождение сигнала через систему из двух 3D-печатных металлизированных преобразователей.

4. Заключение

Комбинация метода синтеза поверхности волноводных преобразователей с 3D-печатью фотополимерами и последующей металлизацией поверхности позволяет быстро производить волноводные преобразователи с требуемыми характеристиками для измерений на малой мощности на частотах в десятки ГГц.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00877)**.

Список литературы

1. Sun J., Hu F. Three-dimensional printing technologies for terahertz applications: A review // *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*. – 2020. – Т. 30. – № e21983. – С. 1-17.
2. Tomassoni C., Bozzi M. Microwave Components Realized by Additive Manufacturing Techniques // *Radioengineering*. – 2020. Т. 29. – № 1. – С. 1-9.
3. Vinogradov D.V., Denisov G.G. Waveguide mode converters with step type coupling // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* – 1991. – Т. 12. – №2. – С. 131–140.
4. Sobolev D.I., Denisov G.G., Principles of Synthesis of Multimode Waveguide Units // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2010. – Т. 38. – № 10. – С. 2825 – 2830.