

## ПРОПУСКАНИЕ КОАКСИАЛЬНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Д.В. ПОНКРАТОВ<sup>1</sup>, А.В. ШИЛОВ<sup>1</sup>, А.Б. СОТСКИЙ<sup>1</sup>, М.М. НАЗАРОВ<sup>2</sup>

1 – Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова г. Могилев, Республика Беларусь,  
2 – Курчатовский институт, г. Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 18 февраля 2024

**Аннотация.** С позиций создания эффективных линий передачи терагерцовых сигналов исследованы модовые характеристики коаксиальных диэлектрических волноводов. Сопоставлены спектры затухания рабочих мод стандартного трубчатого и коаксиального волноводов. Установлены условия, при которых коаксиальный диэлектрический волновод обеспечивает более высокое пропускание передаваемого сигнала.

**Ключевые слова:** коаксиальный диэлектрический волновод, терагерцовое излучение, метод функций Грина.

## Введение

Технологии передачи терагерцовых (ТГц) сигналов представляют интерес в связи с интенсивной разработкой 6G информационных систем. Основная проблема при их создании – значительное поглощение ТГц излучения всеми известными средами, за исключением сухого воздуха. В настоящей работе рассматриваются коаксиальные волноводы, в которых волноведущая сердцевина и трубчатая оболочка выполнены из полимера. Рабочий диапазон частот такого волновода находится вблизи частоты отсечки моды сердцевины. Это позволяет снизить затухание передаваемого ТГц излучения до уровня материальных потерь в среде, заполняющей волновод (например, в сухом воздухе).

## Конфигурация волновода и схема измерений

На рис. 1,а представлена конфигурация рассматриваемого волновода, в которой диэлектрический стержень диаметра  $d$  концентрически вставлен в диэлектрическую трубку с внутренним диаметром  $D$  и толщиной стенки  $w$ . Диэлектрические элементы окружены сухим воздухом с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_a = 1$ .

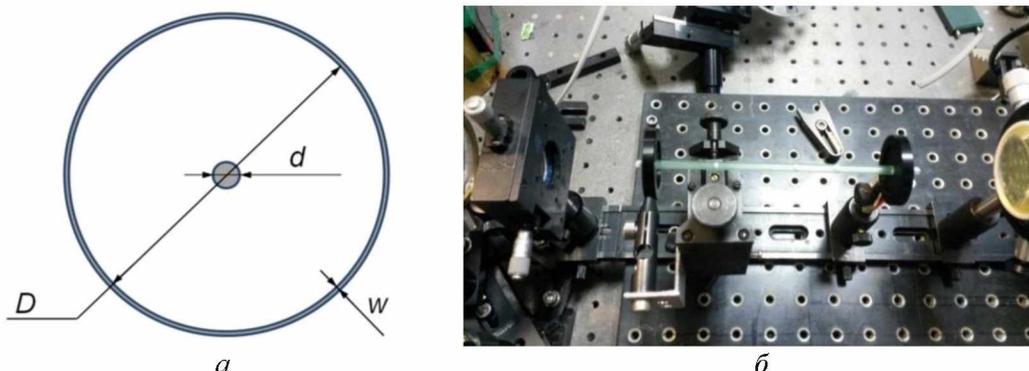


Рис. 1. Конфигурация коаксиального волновода (а) с характерными параметрами, и его экспериментальный образец, закрепленный в измерительной установке (б)

В настоящей работе исследованы измеренные спектры пропускания экспериментальных

образцов в виде коаксиального диэлектрического волновода длиной  $L = 25$  см и параметрами  $D = 6000$   $\mu\text{m}$ ,  $w = 200$   $\mu\text{m}$  и  $d = 500$   $\mu\text{m}$ , а также в виде полого трубчатого волновода диаметром  $D = 6000$   $\mu\text{m}$  и толщиной стенки  $w = 200$   $\mu\text{m}$ . В качестве материала волноводов выбран полипропилен с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,246 - i0,0036$ . Центрирование стержня относительно трубки в коаксиальном волноводе обеспечивалось пятью микроструктурными полипропиленовыми шайбами толщиной  $l = 2,4$  мм с центральным отверстием для стержня. Возбуждение волноводов осуществлялось пикосекундными импульсами с частотой повторения 80 МГц. Пространственного согласование входного и выходного импульсов с фотоантеннами достигалось при помощи линз (см. рис. 1, б). Зависимость электромагнитного поля от времени выбрана в виде  $e^{i2\pi ft}$ .

### Анализ полученных результатов

Для интерпретации экспериментальных результатов спектры пропускания рассматриваемых волноводов на рис. 2 сопоставлены с рассчитанными частотными зависимостями коэффициентов затухания мод волноводов, принимающих участие в их формировании. Расчет модовых и дисперсионных характеристик коаксиального и трубчатого волноводов был выполнен строгим методом функций Грина [1]. Штриховыми линиями на рис. 2 отмечен уровень модовых потерь, при котором модуль амплитуды моды после прохождения волновода длиной  $L = 25$  см уменьшается вдвое. Качественно можно считать, что вклад некоторой моды в спектр выходного импульса является существенным лишь в том случае, когда ее коэффициент затухания, выраженный в dB/m, находится ниже данной линии.

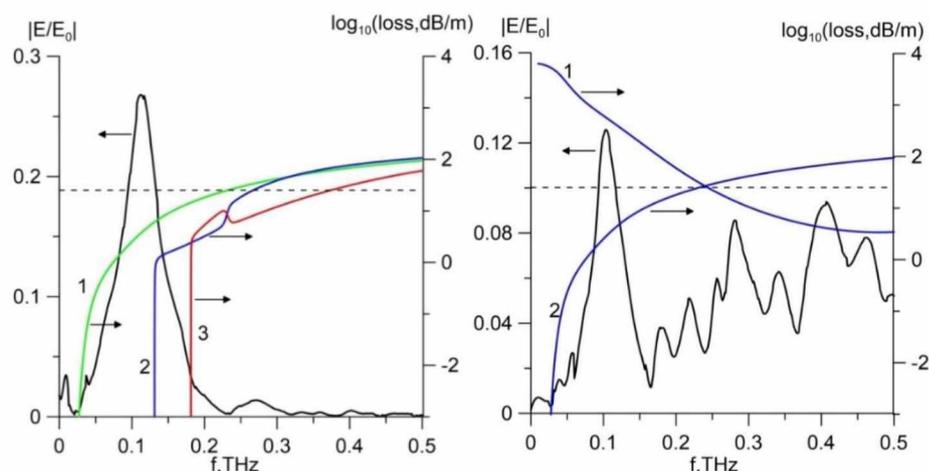


Рис. 2. Сопоставление спектров пропускания коаксиального (а) и трубчатого (б) волноводов с частотными зависимостями затухания рабочих мод данных волноводов

Сравнивая экспериментальные спектры пропускания (черные кривые на рис. 2, а и 2, б), можно заметить, что коаксиальный волновод обеспечивает гораздо лучшее пропускание низких частот по сравнению с трубчатым волноводом. Цветными кривыми 1 – 3 на рис. 2, а представлены спектры затухания трех собственных мод коаксиального волновода, имеющих минимальное затухание. Теоретическое исследование полей этих мод по методу функций Грина [1] показало, что к основной моде коаксиального волновода относится кривая 3, а кривые 1 и 2 соответствуют модам волновода, локализованным в окрестности стенки трубки. Типичное распределение интенсивности последних мод приведено на рис. 3 (конкретно рис. 3 относится к кривой 1 на рис. 2, а и частоте  $f = 0,1$  ТГц).

Анализ рис. 2, а и применение к выходному сигналу волновода преобразования Фурье-Габора с гауссовым окном по технике, описанной в [2], позволяет заключить, что спектр пропускания коаксиального волновода в диапазоне частот 0,05 – 0,25 ТГц определяется в основном модами, локализованными в окрестности стенки трубки, на характеристики которых заметно влияет окружение волновода. Слабый вклад основной моды коаксиального волновода в

спектр его пропускания можно объяснить не оптимальными условиями ее возбуждения в эксперименте и дифракцией данной моды на фиксирующих центральный стержень шайбах.

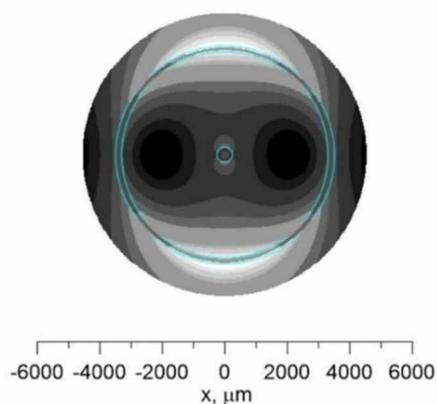


Рис. 3. Оптическая плотность собственной моды коаксиального волновода, локализованной в окрестности стенки трубки

Кривые 1 и 2 на рис. 2,б соответствуют двум модам трубчатого волновода с минимальным затуханием. Кривая 1 соответствует хорошо известной основной вытекающей моде, которая формирует высокочастотный спектр пропускания трубчатого волновода. Кривая 2, определяющая низкочастотный спектр пропускания данного волновода, относится к его собственной моде, локализованной в окрестности его периметра. Она имеет свойства, аналогичные свойствам подобных мод коаксиального волновода (кривая 1 рис. 2,а).

### Заключение

Проведен анализ экспериментальных спектров пропускания коаксиального диэлектрического и полого трубчатого волноводов. Показано, что коаксиальный волновод обеспечивает лучшее пропускание излучения низкочастотного ТГц спектра, при оптимальных условиях возбуждения мод, оптические поля которых локализованы около диэлектрической сердцевины.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций» и аспирантского гранта МО Республики Беларусь с темой «Расчет микроструктурных оптических волокон с тонкопленочными покрытиями».

## TRANSMISSION OF A COAXIAL DIELECTRIC WAVEGUIDE

D.V. PONKRATOV, A.V. SHILOV, A.B. SOTSKY, M.M. NAZAROV

**Abstract.** From the standpoint of creating efficient transmission lines for terahertz signals, the mode characteristics of coaxial dielectric waveguides have been studied. The attenuation spectra of the operating modes of standard tubular and coaxial waveguides are compared. Conditions have been established under which a coaxial dielectric waveguide provides higher transmission of the transmitted signal.

*Keywords:* coaxial dielectric waveguide, terahertz radiation, Green's function method

### Список литературы

1. Сотский А.Б. Теория оптических волноводных элементов. Могилев: УО «МГУ им. А.А. Кулешова», 2011.
2. Nazarov M.M., Mukina L.S., Shuvaev A.V., Sapozhnikov D.A., Shkurinov A.P., Trofimov V.A. // Laser Phys. Lett. 2005. Vol. 2, No. 10. P. 471–475.