

А.Б. Сотский¹, А.В. Шилов¹, С.С. Михеев¹, М.М. Назаров²

¹ УО «МГУ имени А.А. Кулешова», Могилев, Беларусь

² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

КОАКСИАЛЬНЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Введение

Волноводы для передачи терагерцового (ТГц) излучения востребованы в импульсной ТГц спектроскопии. Трудности их изготовления сопряжены с тем, что все известные материалы сильно поглощают ТГц волны. Поэтому волновод должен обеспечивать транспортировку ТГц излучения преимущественно по воздуху. Для ряда приложений такие волноводы должны также обладать достаточной механической гибкостью и пренебрежимо слабым влиянием на передаваемое излучение со стороны окружающей среды. Особый интерес с позиций создания медицинских ТГц зондов представляют полимерные волноводы, работающие в диапазоне 0.1 – 0.5 ТГц. Однако для известных типов полимерных ТГц волноводов [1] данный диапазон проблематичен, поскольку в нем сочетание приемлемого затухания передаваемого сигнала и необходимой гибкости волновода не возможно ввиду значительного (более 1 см) диаметра последнего. В данном сообщении предлагается новая коаксиальная конфигурация полимерного ТГц волновода, позволяющая преодолеть указанное ограничение. В отличие от известных коаксиальных диэлектрических волноводов, в которых волноведущая сердцевина отделяется от окружающей среды ди-

электрическими слоями, рассматриваемый волновод состоит из полимерного стержня, вставленного в полую полимерную трубку. Уникальные свойства такой конфигурации вблизи критических условий позволяют сочетать низкое затухание ТГц сигнала в выбранной полосе частот с приемлемыми поперечными размерами волновода.

1. Модовые характеристики коаксиального волновода

В работе представлены расчетные данные для дисперсионных полей и дисперсионных характеристик мод коаксиального волновода, в котором диэлектрический стержень диаметра d вставлен в диэлектрическую трубку с внутренним диаметром D и толщиной стенки w . В качестве диэлектрика рассмотрен полипропилен, обладающий высокой прозрачностью и пренебрежимо малой дисперсией в указанном выше диапазоне частот. Его диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2.247 - i0.0036$ [1]. Диэлектрические элементы окружены воздухом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_a = 1$. Вычисления выполнены строгим методом [2], применимым к слоистым структурам с циркулярной симметрией. Зависимость электромагнитного поля от времени выбрана в виде $\exp(i2\pi ft)$. Исследованы HE_{1m} моды, допускающие симметричное торцевое возбуждение линейно поляризованным пучком [1].

На рисунке 1 сопоставлены дисперсионные кривые широко обсуждаемого в современной литературе трубчатого волновода ($d = 0\mu m$, $w = 181\mu m$), предлагаемого коаксиального волновода ($d = 200\mu m$, $w = 181\mu m$) и круглого диэлектрического волновода в виде полипропиленового стержня, окруженного воздухом ($d = 200\mu m$, $w = 0\mu m$). Расчеты выполнены при $D = 6000\mu m$.

Выбранный диапазон частот соответствует одномодовому круглому волноводу и первому окну прозрачности [1] трубчатого волновода. Значение $w = 181\mu m$ отвечает минимуму затухания основной моды трубчатого волновода при $f = 0.4THz$.

Согласно рисунку 1, в диапазоне $f_c < f < 0.381THz$ минимальное затухание ТГц излучения обеспечивает коаксиальный волновод. В частности, при $f = 0.3776THz$ затухание его основной моды достигает рекордно низкого на настоящий момент значения $0.008dB/m$. Сопоставление кривых 1 и 2 позволяет заключить, что в указанном диапазоне отрезок коаксиального волновода протяженностью более 10см может рассматриваться как одномодовый. Кроме того, в диапазоне

$f_c < f < 0.44\text{THz}$ коаксиальный волновод по пропусканию излучения превосходит оптимизированный трубчатый волновод с таким же значением D .

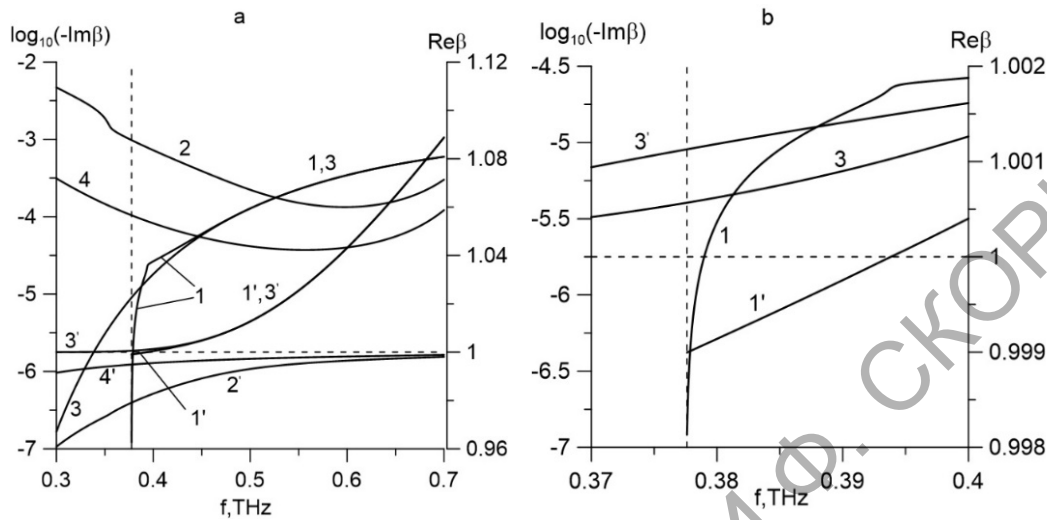


Рисунок 1 – Дисперсионные зависимости мнимых (1 - 4) и вещественных (1' - 4') частей безразмерных постоянных распространения мод β в увеличенных (а) и уменьшенных (б) масштабах. Кривые 1, 1' и 2, 2' относятся к HE_{11} и HE_{12} модам коаксиального волновода; 3, 3' - к HE_{11} моде круглого волновода; 4, 4' - к HE_{11} моде трубчатого волновода. Штриховыми линиями отмечены частота отсечки основной моды коаксиального волновода $f_c = 0.3775\text{THz}$ и показатель преломления воздуха

Важной отличительной особенностью коаксиального волновода является наличие у его HE_{11} моды частоты отсечки. Именно в окрестности этой частоты данная мода демонстрирует экстремально низкое затухание. Существование частоты отсечки у основной моды коаксиального волновода иллюстрируют диаграммы расположения корней дисперсионных уравнений на комплексной плоскости, приведенные на рисунке 2 и полученные в результате исследования ряда волноводов.

Сплошные кривые на рисунке 2а располагаются на римановом листе $\text{Im } \xi < 0$, Они соответствуют собственным модам волноводов. При $f \rightarrow 0$ кривая 2 стремится к точке ветвления $\beta^2 = \epsilon_a$. Кривая 1 по мере уменьшения частоты переходит с листа $\text{Im } \xi < 0$ на не физический лист $\text{Im } \xi > 0$ (отрезок штриховой линии), где наблюдается ее усиление по мере распространения вдоль волновода. Данный переход име-

ет место при $f = f_c \neq 0$. На этой частоте мода является быстрой ($\text{Re}\beta^2 < \varepsilon_a$). Корни дисперсионного уравнения для основной моды трубчатого волновода находятся на римановом листе $\text{Im}\xi > 0$, причем $\beta^2 \rightarrow \varepsilon_a$ при $f \rightarrow 0$. Высшая мода HE_{12} коаксиального волновода обладает такими же свойствами.

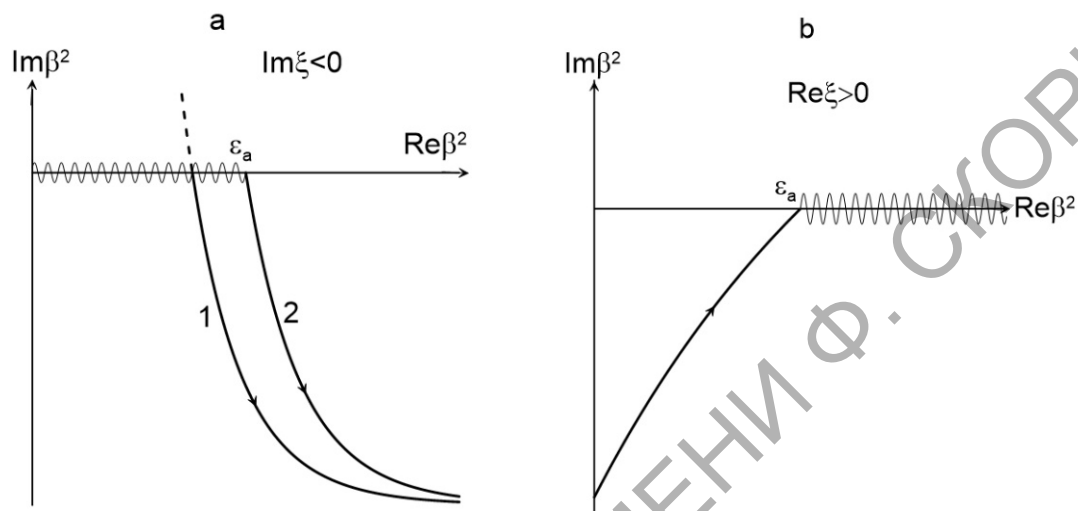


Рисунок 2 – Качественные диаграммы расположения корней дисперсионных уравнений для мод HE_{11} коаксиального (кривая 1), круглого (2) (а) и трубчатого (б) волноводов. Стрелками отмечены направления роста частоты. Волнистые линии – разрезы радикала $\xi = \sqrt{\varepsilon_a - \beta^2}$

Рисунок 3 иллюстрирует распределения продольной компоненты вектора Пойнтинга S_z рассмотренных мод на частоте $f = 0.3776\text{THz}$. Эти распределения отвечают модам с четной относительно оси симметрии волноводов компонентой поля H_x .

Согласно рисунку 3, основная и высшая моды коаксиального волновода в окрестности $f = f_c$ имеют пространственные распределения, близкие к пространственному распределению основной моды круглого диэлектрического волновода. По сравнению с распределением основной моды трубчатого волновода эти распределения более сжаты в пространстве, что указывает на более низкие изгибные потери соответствующих им мод.

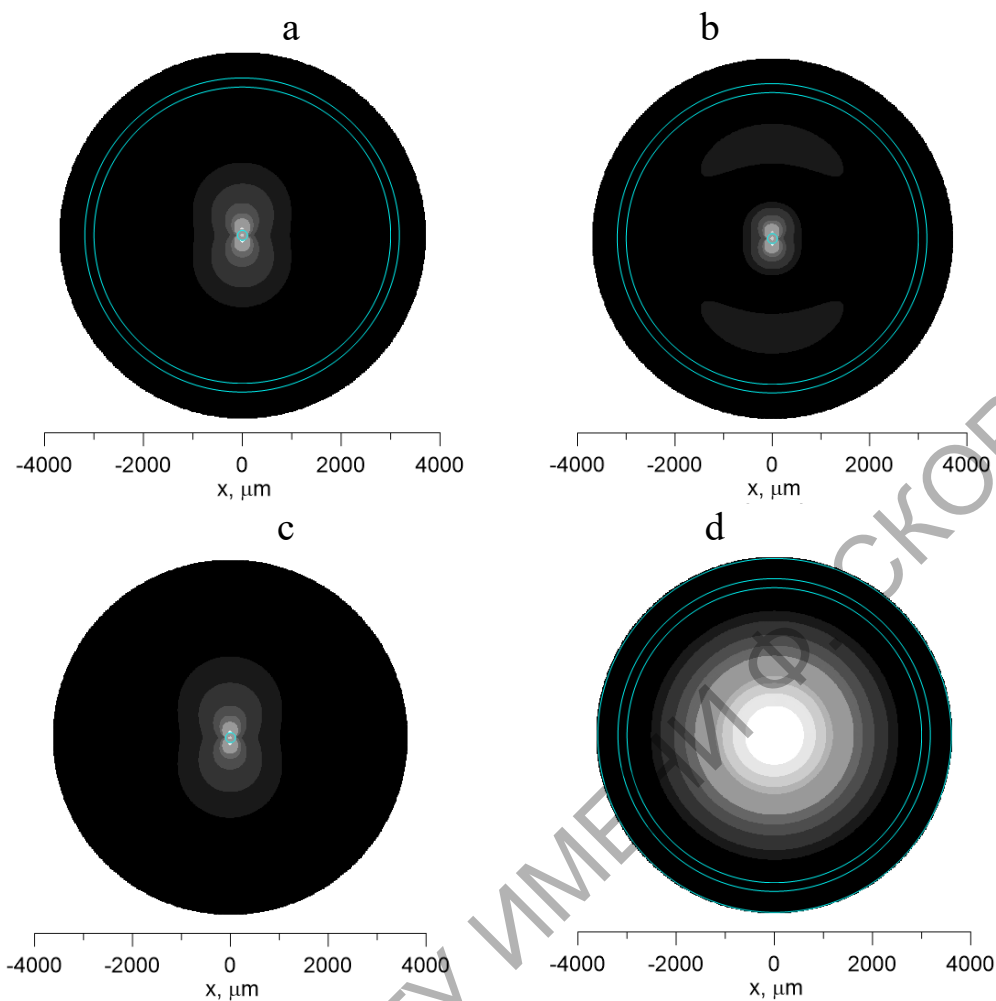


Рисунок 3 – Оптические плотности основных мод HE_{11} коаксиального (а), круглого (с), трубчатого (д) волноводов и высшей моды HE_{12} коаксиального волновода (b).

Окружности – границы раздела сред

Рисунок 4 иллюстрирует чувствительность основных мод HE_{11} рассмотренных волноводов к вариациям диэлектрической проницаемости окружающей среды. Здесь производная $d\beta^2 / d\epsilon_a$ рассчитана при $\epsilon_a = 1$; во внутренней области трубки $\epsilon_a = 1$.

Как видно из рисунка 4, в окрестности критических условий для коаксиального волновода коаксиальный и трубчатый волновод имеют сопоставимые параметры чувствительности, которые на два порядка меньше параметра чувствительности круглого волновода.

Заключение

Коаксиальный диэлектрический ТГц волновод позволяет сочетать одномодовый режим работы, малый внешний диаметр и низкие потери передаваемого сигнала. В настоящее время мы решаем проблемы его практического изготовления.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант F18R-143) и РФФИ (грант №18-52-00040).

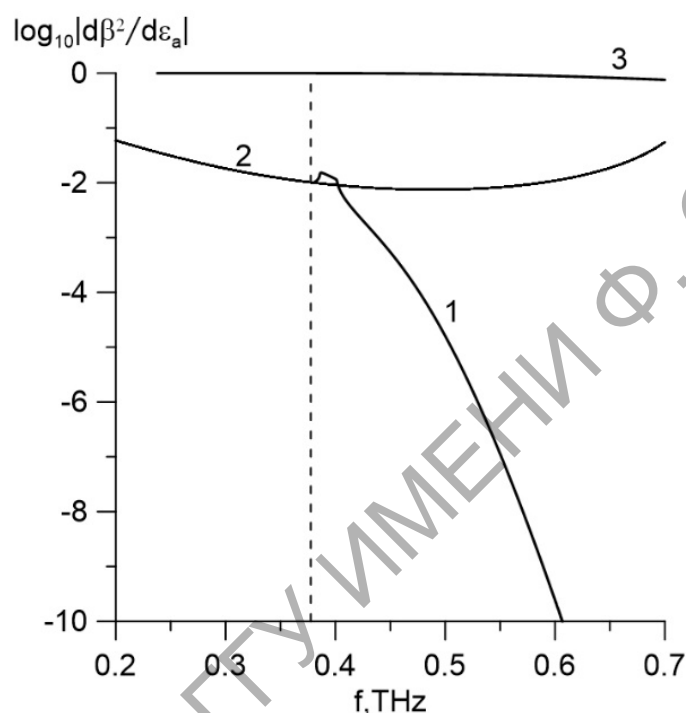


Рисунок 4 – Частотные зависимости параметра чувствительности основных мод волноводов к окружающей среде $|d\beta^2 / d\epsilon_a|$. Кривая 1 – коаксиальный волновод, 2 – трубчатый волновод, 3 – круглый диэлектрический волновод, штриховая линия – частота отсечки коаксиального волновода

Литература

1. Eight-capillary cladding THz waveguide with low propagation losses and dispersion / M.M. Nazarov [et al.]// IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2018. – Vol.8, Issue 2. – P.183 – 191. DOI: 10.1109/TTHZ.2017.2786030.
2. Унгер, Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы / Х.-Г. Унгер. – Пер. с англ. под ред. В.В. Шевченко. – М.: Мир, 1980. – 656 с.