

УДК 681.7.068;535.8

## МОДОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ВОЛОКОН С НЕСОПРИКАСАЮЩИМИСЯ КАПИЛЛЯРАМИ В ОБОЛОЧКЕ

А. В. ШИЛОВ, П. А. ШОЛКОВ

Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова  
Могилев, Беларусь

Одним из знаковых достижений в области микроструктурных волокон (МВ) с полый сердцевинной является введение концепции отрицательной кривизны [1], которая привела к разработке семейства волокон с одним рядом соприкасающихся/несоприкасающихся капилляров оболочки. Особенностью таких МВ является возможность минимизировать пространственное перекрытие между оптическим полем основных мод полый сердцевинной и микроструктурой оболочки, что позволило стать им хорошей платформой для передачи терагерцового (ТГц) излучения [1, 2]. Например, в [1] представлено МВ, напечатанное на относительно дешевом 3D-принтере с разрешением  $\sim 400 \mu\text{m}$  дешевым ABS-полимером, длиной 10 см и внешним диаметром порядка 2...3 см. В [2] численно исследовали пропускание терагерцовых полых антирезонансных волокон (НС-ARF) с внутренними капиллярами. Авторы показали, что такие волокна имеют антирезонансную проводимость в диапазоне 0,1...1,6 ТГц, подтвержденную численно, а эллиптические внутренние элементы снижают потери на утечку.

Анализ [1, 2] позволяет сделать вывод об отсутствии строгих и универсальных методов расчета МВ с полый сердцевинной и элементами отрицательной кривизны. Кроме того, экспериментальные образцы таких волокон, как правило, печатаются на 3D-принтерах, имеют достаточно высокие потери при малой длине и большом поперечном диаметре.

В докладе представлены результаты решения волноводных задач для вытекающих мод (МВ) с полый сердцевинной и несоприкасающимися капиллярами в оболочке методом функций Грина [3]. На языке Fortran 90 разработаны программы, позволяющие выполнить детальный расчет дисперсионных характеристик МВ указанного типа, а также построить пространственные распределения оптической плотности направляемых ими мод и диаграммы излучения энергии поля моды на внешней границе волокна.

На рис. 1, *а* приведены рассчитанные зависимости потерь основной и высших мод на частоте  $f = 1 \text{ ТГц}$  для полипропиленовых волокон с начальным внешним радиусом сборки  $R_0$  (внутренний радиус оболочки)  $R_0 = 4200 \text{ мкм}$  от величины зазора  $d_z$ , нормированного на первоначальный радиус капилляров  $b$ .

На рис. 1, *б* представлены распределение оптической плотности поля основной моды и диаграмма излучения ее энергии на внешней границе оболочки. Расчет выполнен при величине зазора  $d_z = 580 \text{ мкм}$ , что составляет 50 % первоначальной величины внешнего радиуса капилляра  $b = 1160 \text{ мкм}$ . Новый внешний радиус «сборки капилляров»  $R_0 = 3900 \text{ мкм}$ . Расстояние между

центрами соседних капилляров  $r$  было фиксировано и составляло  $2b = 2320$  мкм. В качестве материала оболочки использован полипропилен с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2,247 - i0,0036$ .

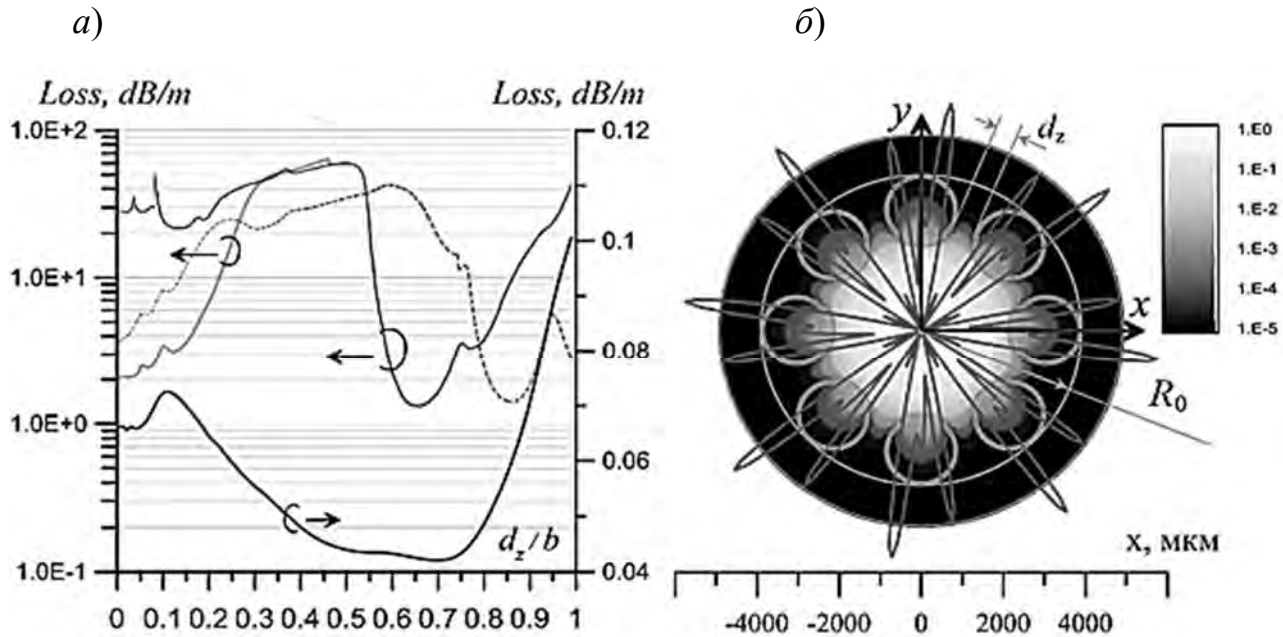


Рис. 1. Зависимость потерь основной и первых высших мод капиллярного МВ от величины зазора между капиллярами (а), а также оптическая плотность поля основной моды и диаграмма излучения ее энергии (б)

Анализ поведения кривых, представленных на рис. 1, а, показывает, что уменьшение потерь основной моды приводит к повышению степени одномодовости МВ с несоприкасающимися капиллярами. Так, при  $d_z/b \approx 50\% \dots 75\%$  потери основной моды уменьшаются в 1,5 раза. Однако при этом наблюдается резкое увеличение потерь высших мод примерно в 20–40 раз ( $d_z/b \approx 30\% \dots 55\%$ ).

Из анализа оптической плотности моды, представленной на рис. 1, б, следует, что зазоры между капиллярами способствуют удержанию основной моды, но позволяют при этом ее полю занимать большее пространство. Однако данный эффект не безграничен и при величине  $d_z/b > 55\%$  степень одномодовости начинает резко уменьшаться.

*Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф25М-032 от 02 мая 2025 г.).*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alice, L. 3D printed hollow core fiber with negative curvature for terahertz applications / L. Alice, S. Cruz // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2015. – Vol. 14, № 1. – P. 45–53.
2. Alice, L. Exploring THz hollow-core fiber designs manufactured by 3D printing / L. Alice, S. Cruz // IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). – 2017.
3. Сотский, А. Б. Теория оптических волноводных элементов: монография / А. Б. Сотский. – Могилев : МГУ им. А. А. Кулешова, 2011. – 456 с.