

Метод формирования отражателя заданной формы В МНОГОМОДОВОМ ВОЛОКНЕ

В.С. Терентьев*, А.В. Достовалов, А.Г. Кузнецов, В.А. Симонов,
Х.А. Ризк, С.К. Голубцов, С.А. Бабин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН

**E-mail: terentyev@iae.nsk.su*

DOI:10.31868/RFL.2024.77-79

Существует ряд задач, где необходимо производить пространственную амплитудно-фазовую, а также частотную фильтрацию излучения в многомодовых волокнах [1, 2], в частности, на торце таких волокон. В нашем случае подобный элемент был необходим для задачи селекции поперечных мод в волоконном многомодовом лазере, где требуется пространственная фильтрация собственных мод. Для этих целей необходимо было разработать метод формирования зеркала с заданным пространственным распределением в поперечном сечении многомодового волокна.

Разработанная технология включает несколько этапов: подготовка торца волокна, покрытие его фоторезистом, экспонирование фемтосекундным излучением, нанесение тонкопленочного покрытия, очистка маски фоторезиста. Далее производилась апробация результатов с точки зрения лучевой стойкости. По сути данная технология является стандартной технологией фотолитографии, представленной в литературе [3], однако есть некоторые нюансы, о которых хотелось бы сообщить.

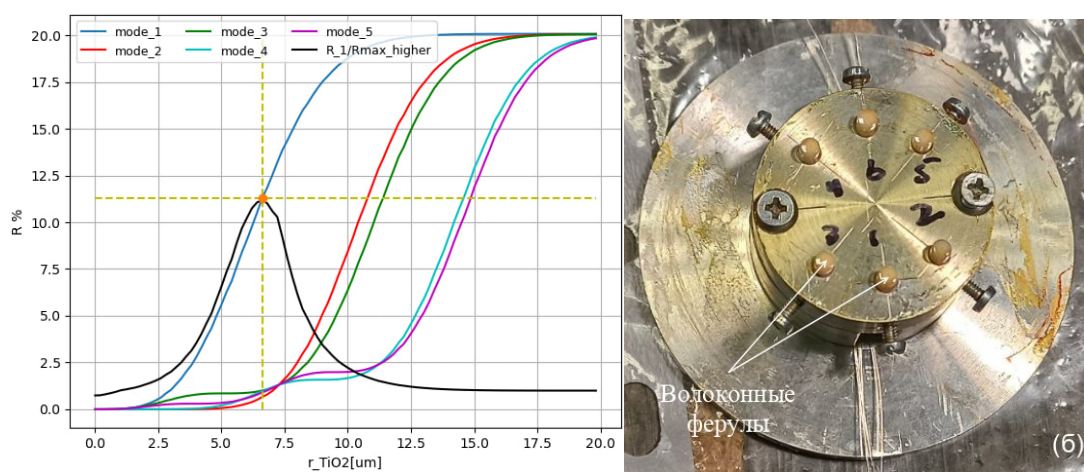


Рис. 1. (а) – интегралы перекрытия пяти мод в зависимости от радиуса зеркала, черная линия - отношение интегралов перекрытия первой моды к максимуму из остальных, (б) – держатель ферул.

Для экспериментов с мощным волоконным лазером требовалось изготовить отражатель с круглой формой, расположенной в центре волокна, способного выдержать интенсивность порядка $10 \text{ МВт} / \text{см}^2$. Цель была в возбуждении в резонаторе только основной моды. Для этого необходимо было определить оптимальную форму отражателя (его диаметр) с точки зрения минимума потерь для основной моды по отношению к высшим. С помощью математического моделирования в COMSOL Multiphysics 6.0 были рассчитаны моды целевого градиентного волокна Draka 100 / 140 мкм. Было оценено, что оптимальное соотношение по потерям, представляющим собой интеграл перекрытия моды волокна с распределением, отраженным от зеркала, для первых пяти мод с угловым

индексом 1, будет при диаметре 12 - 14 мкм (Рисунок 1а, около максимума черной линии). Расчеты проводились для случая как с просветляющим покрытием на периферийной области (Рисунок 1а), так и без него (оптимальный диаметр 15 - 17 мкм). Далее, подготовленное и заклеенное на канадский бальзам в волоконных втулках волокно закреплялось в специальный держатель (Рисунок 1б) и покрывалось методом центрифугирования слоем фоторезиста ФПН-2506 толщиной до 1 мкм, разбавленный 3 / 1,5.

Экспонирование фоторезиста производилось на установке фемтосекундной лазерной записи на длине волны 513 нм, длительность импульса 220 фс, варьировались уровень энергии и скорость (среднее количество импульсов). После проявления (УПФ - 1Б 1 / 4) получилась маска (Рисунок 2а). На данную маску было напылено покрытие из одного слоя TiO_2 методом магнетронного распыления в вакууме (коэффициент отражения 20%). После напыления маска фоторезиста удалялась с помощью ацетона (Рисунок 2б). Было изготовлено несколько диаметров зеркала (10, 12, 15 мкм).

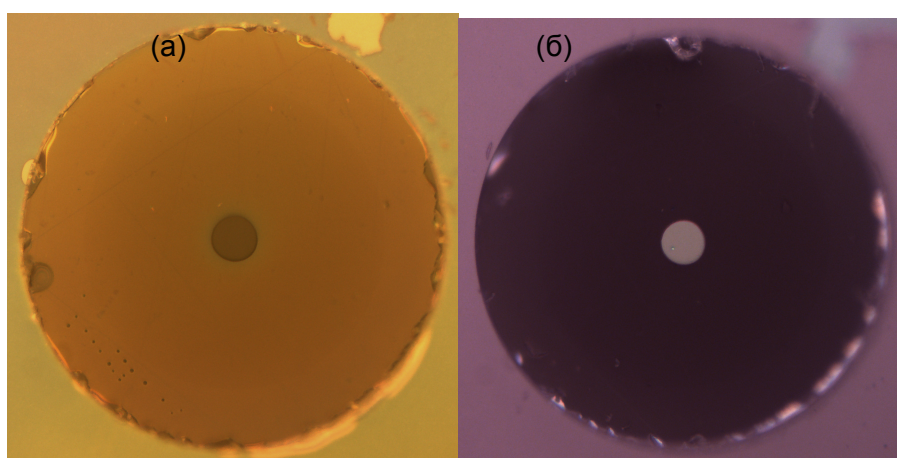


Рис. 2. Изображение торца волокна Драка 100/140: (а) – проявленная маска фоторезиста, (б) – итоговое зеркало диаметром 15 мкм после очистки.

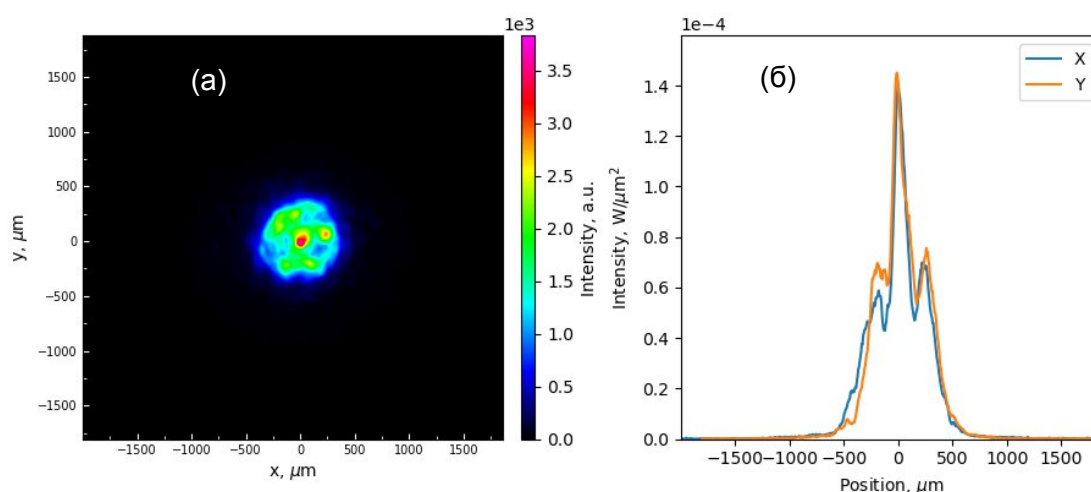


Рис. 3. Распределение мощности генерации сигнала 1го стокса на торце волокна Драка 100/140: (а) – цветовая карта, (б) – графики интенсивности в области измерительной матрицы по ортогональным сечениям.

После изготовления волокна расклеивались из втулок с помощью нагрева до температуры плавления канадского бальзама. После этого волокна очищались от остатков бальзама, а торец финально очищался о специальную салфетку для чистки волокон. На рис. 3 представлены результаты тестирования зеркала

диаметром 12 мкм без просветляющего покрытия в волоконном многомодовом рамановском лазере. Полная мощность генерации 976 нм составляла 31 Вт, из них через зеркало проходило 6.5 Вт, плюс частичная энергия из накачки 938 нм - 60 Вт - 1,5 Вт, итого на зеркало падало около 10 Вт мощности, что соответствует 0,8 МВт/см². При этом пиковое значение в центре зеркала достигало 17 МВт/см² падающей мощности сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта госзадания ИАиЭ FWNG-2024-0015 (метод формирования торцевого отражателя) и гранта РНФ №21-72-30024 (применение в многомодовом лазере). Использован вычислительный комплекс с лицензированным ПО COMSOL ЦКП "Спектроскопия и оптика" (ИАиЭ СО РАН).

Литература

- [1] M. Pisco, F. Galeotti, G. Quero, et al. *Light Sci Appl* **6**, e16229 (2017).
- [2] O. Yermakov, H. Schneidewind, U. Hübner, et al. *ACS Photonics*. **7**, 10, 2834–2841 (2020)
- [3] L. Wang, N. Luo, Z. Zhang, et al *Opt. Express* **30**, 676-688 (2022)