

ФОРМИРОВАНИЕ КОНЧИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА:

ПРИМЕНЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В данной работе [1] описаны различные формы кончиков **ОВ**. Особое внимание уделено широко используемым сужающимся кончикам. Проведено исследование с целью оценить зависимость оптических потерь таких кончиков от длины сужения, входной числовой апертуры (**NA**) и диаметра сердцевины **ОВ**. Проанализированы кончики с параметрами сужения 2:1, апертурой **ОВ**, равной 0,22, и диаметром сердцевины **ОВ** – 200, 400 и 500 мкм.

Кончики **ОВ** – это машинно обработанные зачищенные концы **ОВ**, для формирования которых не используется дополнительный материал. Они готовятся с помощью механической или лазерной обработки и очень удобны в медицинских и промышленных приложениях.

Предлагается большой набор типов таких кончиков, изменяющих форму или направление лазерного луча, входящего или выходящего из **ОВ**. Так как кончик сформирован из стекла **ОВ**, то не нужен интерфейс между ним и **ОВ**. Следовательно, между ними нет и вносимых потерь, как исключена и возможность увеличения затухания в месте стыка, что имеет место при сварке. Это способствует уменьшению оптических потерь, увеличению механической прочности и срока службы изделий.

На рис.1 [2] показаны несколько типов таких кончиков и дано краткое описание их функционального назначения. Ниже некоторые из этих типов описаны более подробно.

Линзы

На кончике могут быть сформированы вогнутые, выпуклые и сферические (шариковые) линзы. Эти линзы используются для изменения расходимости луча (что улучшает связь между лазерным диодом (**ЛД**) и **ОВ** благодаря уменьшению френелевских потерь), уменьшения или увеличения глубины фокуса, размера выходного пятна и коллимированного света. Спектр используемых приложений очень широк: от линий

связи малой мощности до промышленных лазеров большой мощности. Эти линзы можно комбинировать с другими типами кончиков, например, с вогнутыми линзами на концах сужающихся кончиков.

Диффузоры

Диффузоры обычно используются на дальнем конце **ОВ** для изменения направления и равномерного (по всем 360°) рассеивания оптической мощности по длине цилиндрических выходов такого кончика. Для этого у них на стекло **ОВ** обычно наносят механическую насечку так глубоко, чтобы рассеивать свет, проходящий через сердцевину **ОВ**. Этот свет заполняет все освещаемое вокруг пространство, что нужно для таких приложений, как фотодинамическая терапия или при операции на тканях (например, урологические процедуры и операции на простате). Диффузорный/рассеивающий кончик, имеющий достаточно глубокие насечки, часто имеет кварцевую чашу, покрывающую его для увеличения механической стойкости и защиты от загрязнения.

Боковой выход

Боковой выход состоит обычно из 45°-зеркала (углового перехода), сформированного на дальнем конце **ОВ**. Оптический луч направляется таким переходом под углом 90° к оси **ОВ**. Это нужно при инвазивных хирургических процедурах, тре-

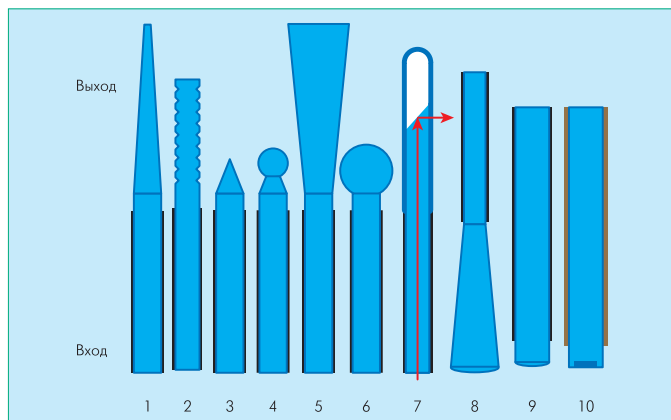


Рис.1 Различные типы формируемых кончиков: 1 – сужение, уменьшающее сердцевину – увеличение апертуры; 2 – диффузор – цилиндрический излучатель; 3 – конусный кончик – широкоугольный излучатель; 4 – сужение со сферической линзой – фокусатор или коллиматор; 5 – сужение на выходе с увеличением сердцевины – уменьшение апертуры, увеличение сердцевины; 6 – интегральная сферическая линза – фокусатор; 7 – боковой выход – разворот луча под прямым углом; 8 – сужение на входе с увеличением сердцевины – увеличение апертуры, уменьшение плотности мощности; 9 – интегральная положительная линза; 10 – интегральная отрицательная линза

бующих изменения направления оптического пучка в ограниченном пространстве, например при удалении тканей, разрезах и перфорации (например, при трансмиокардиальной реваскуляризации (TMR)).

Сужения

Сужения можно использовать как на ближнем, так и на дальнем концах ОВ. Они могут формировать увеличение или уменьшение диаметра сердцевины ОВ. Наиболее общий тип формируемого кончика в медицине и промышленности – сужение с увеличенной сердцевиной на ближнем конце ОВ. Этот тип сужения допускает снижение плотности мощности на приемном конце и увеличивает диаметр сердцевины для мощности входящего пучка. Сужения не работают как "световые воронки", а фактически изменяют апертуру света при его прохождении по сужению (теряется свет, превосходящий критический угол полного внутреннего отражения в ОВ) [3,4].

Сужения на ближнем конце наиболее часто применяются в медицине и промышленности, где высокая плотность мощности желательна, учитывая малый диаметр используемого ОВ. Возникает ряд ключевых вопросов и определенная озабоченность, связанная с оптическими потерями в таких сужениях. Речь, в частности, идет о потерях, зависящих от геометрии сужения (степени и длине сужения) и диаметре ОВ. Часто полагают, что чем больше длина сужения, тем меньше ожидаемые потери. Это ведет к сужениям длиной в метр и больше! Такие сужения трудно выполнить, а их цена высока.

Как показано ниже, делать это вовсе не обязательно. Другой ключевой вопрос: как влияет входная апертура на оптические потери?

Будучи наиболее общим типом кончика, сужение исследуется нами более подробно. Основная цель исследования – охарактеризовать и измерить зависимость оптических потерь в ОВ от диаметра сердцевины, длины сужения и входной апертуры. Для этого была разработана модель прохождения оптического луча и проведено сравнение измеренных и рассчитанных на модели значений. Измеренные результаты и установление факта адекватности модели – это инструменты, нужные при проектировании сужений и других типов формируемых кончиков, используемых в различных условиях и конкретных приложениях.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

На рис.2 показана схема тестирования, применяемая для измерений световых потерь в сужении. Свет He-Ne-лазера (633 нм) вводится в ОВ с большим диаметром сердцевины, равным большому концу сужения, и апертурой, соответствующей апертуре ОВ-сужения (в нашем случае 0,22). Это входное ОВ имеет полированный ферул на том конце, который сращивается с тестируемым сужением. Сращивание происходит в кварцевой втулке, где входное ОВ стыкуется с большим концом сужения. Гель, выравнивающий коэффициент преломления, устраняет френелевское отражение в срастке. Дальний конец этого сужения стыкуется с Si-детектором измерителя мощности большой площади. Для определения потерь сужения мощность на его выходе сравнивается с мощностью на выходе оптического соединительного шнура (ОСШ) – того же диаметра сердцевины, что и у большого конца сужения, – то есть на выходе той ветви измерительного тракта, где нет сужения. Разница между этими двумя замерами в децибелах преобразуется затем в проценты потерь на сужении.

По этой схеме было протестировано 10 типов сужений (по три образца каждого типа) со степенью сужения 2:1 (см. таблицу). Длина ОСШ для обеих ветвей (с сужением и без) составляла 1–3 м и не контролировалась, так как не влияла на результаты тестирования. Для теста использовались ОВ с двумя набо-

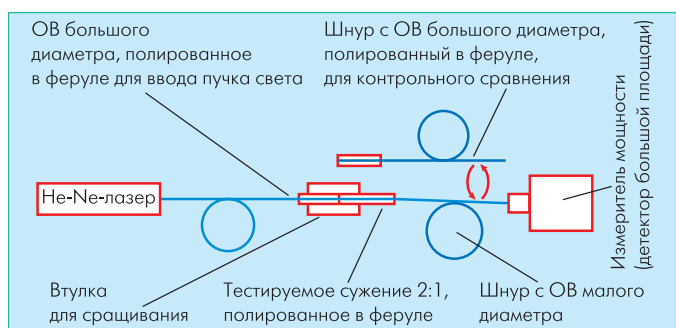


Рис.2 Схема для измерения оптических потерь

Таблица тестируемых типов сужений

| Сердцевина ОВ, мкм | Сердцевина сужения, мкм | Сердцевина входного ОВ, мкм | Длина сужения, мм |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 200 | 400 | 400 | 5 |
| 200 | 400 | 400 | 10 |
| 200 | 400 | 400 | 15 |
| 200 | 400 | 400 | 20 |
| 400 | 800 | 800 | 8 |
| 400 | 800 | 800 | 12 |
| 400 | 800 | 800 | 16 |
| 500 | 1000 | 1000 | 8 |
| 500 | 1000 | 1000 | 12 |
| 500 | 1000 | 1000 | 16 |

рами апертур: 0,22 и 0,12. Для первого набора ($NA=0,22$) диаметр входного ОВ был равен диаметру большого конца сужения и был залит светом He-Ne-лазера. Распределение света по модам было равномерным. Второй набор использовал $NA=0,12$.

Для сужений типа 200/400 мкм применялся источник с малой апертурой и равномерным распределением мод. Для остальных типов сужений такого источника не было, поэтому малая апертура имитировалась путем механического блокирования мод высокого порядка у He-Ne-лазера на его интерфейсе. К сожалению, этот метод не давал высокой равномерности распределения мод, что, видимо, влияло на результаты измерений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Операционные параметры формируемых кончиков

Операционные параметры (NA , размер пятна, плотность мощности, распределение мод) зависят в первую очередь от того, был ли формируемый кончик использован на входе или на выходе. Очевидно, что условия ввода излучения наиболее критичны, когда кончик используется на ближнем (входном) конце, а выходные условия критичны, когда он используется на дальнем (выходном) конце.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУЖЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Сужения как тип кончика применяются очень часто, поэтому важно знать зависимость их оптических потерь от апертуры и ее изменения по длине сужения. На рис.3 приведена диаграмма, где указаны параметры сужения. Наиболее важные из них – отношение диаметра конца сужения к диаметру базового ОВ. Несмотря на сходство сужения с воронкой,

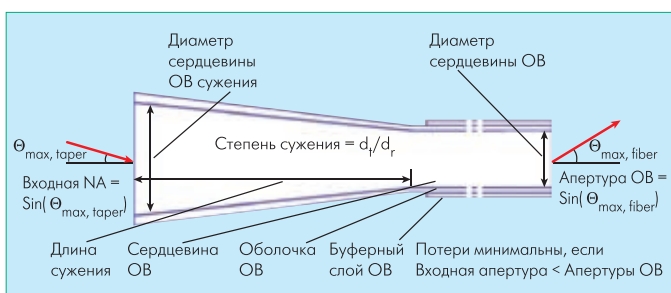


Рис.3 Диаграмма параметров сужения

известная оптическая концепция сохранения яркости не позволяет проводить аналогию между сужением и магической "световой воронкой", которая заставляет свет перетекать из ОВ большого диаметра в малый. При перетекании света приходится платить определенную цену, выраженную в изменении апертуры. Если длина сужения достаточно велика, то:

$$NA_{OUT} / NA_{IN} = d_{IN} / d_{OUT}$$

Поэтому, если апертура рассматривается применительно к тому концу сужения, который был бы приемлем для базового ОВ, то световая пропускная способность – обратно пропорциональна квадрату степени сужения. Так, для сужения 2:1 пропускная способность составит 25%, точно так, как если бы мы соединили встык ОВ большого диаметра с малым без всякого сужения! Однако, если источник, соединенный с сужением со стороны большого диаметра, имеет апертуру, составляющую половину от апертуры базового ОВ, то можно ожидать, что передача будет идеальной при идеальном сужении. Конечно, величина NA для света в этом ОВ будет в два раза выше, чем у оригинального источника.

Зависимость потерь сужения от входной NA и диаметра ОВ

Испытание сужений проводилось на 30 образцах (10 типов по 3), как описано выше, чтобы определить, насколько фактические сужения отличаются от идеальных (модельных) сужений для трех различных диаметров ОВ (рис.4–6).

Первое, что было установлено, – большая чувствительность результата от входной апертуры. При большой входной NA тесты на сужениях 200/400 и 400/800 мкм показали пропускную способность, близкую к 25%, как и ожидалось. Для сужений 500/1000 мкм пропускная способность составила 35%, что существенно больше ожидаемого. Это произошло потому, что апертура ОВ диаметром 500 мкм была близка к допустимому верхнему пределу (0,233), а апертура ОВ 1000 мкм была близка к нижнему пределу (0,20). Поэтому, как и ожидалось, несколько меньшее значение входной NA относительно допустимой выходной NA дало более высокие результаты.

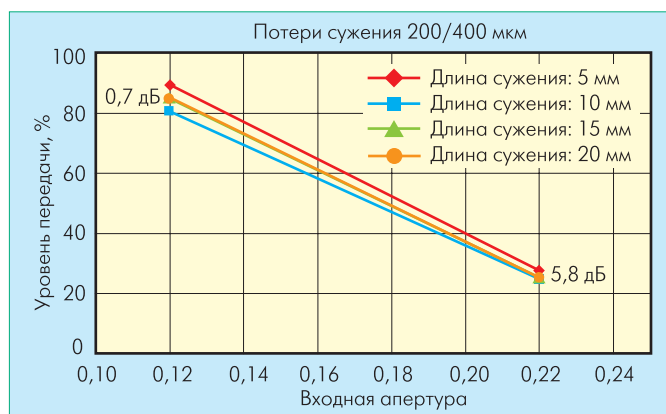


Рис.4 Зависимость потерь от входной апертуры для сужения 200/400 мкм

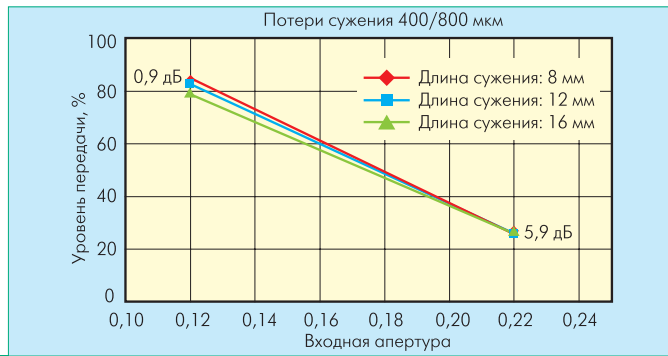


Рис. 5 Зависимость потерь от входной апертуры для сужения 400/800 мкм

Низкая NA, как ожидалось, обеспечивает уровень передачи существенно ближе к 100%. Для сужений 200/400 и 400/800 мкм уровень передачи с входной NA=0,12 составляет 80–90%. Так как 0,12 близко к 0,11, то не удивительно, что уровень передачи так велик. Результаты для сужений 500/1000 мкм хуже (70–75%), вероятно, из-за трудностей в достижении хорошей однородности распределения мод для источника с NA=0,12.

Зависимость потерь сужения от его длины и диаметра ОВ

На рис. 7 и 8 показаны зависимости потерь от длины сужения. Они почти постоянны в большом диапазоне изменения дли-

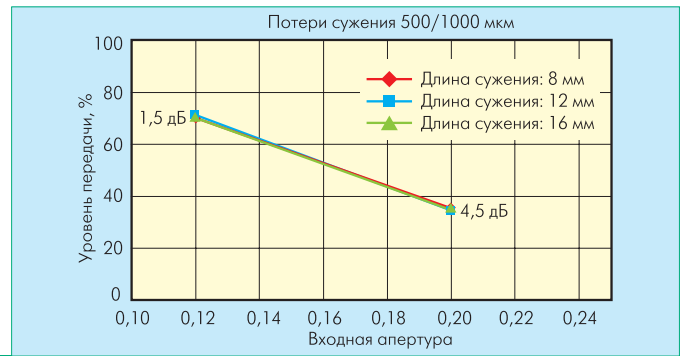


Рис. 6 Зависимость потерь от входной апертуры для сужения 500/1000 мкм

ны. Эта нечувствительность потерь к длине сужения (при больших NA источника) не удивительна, так как даже нулевая длина сужения (прямое соединение большого ОВ с малым) дает 25% пропускной способности. Результаты для сужений 500/1000 мкм лежат в диапазоне 70–75% по причинам, отмеченным выше.

Оптическое моделирование сужения

Чтобы осуществить независимое обоснование адекватности результатов экспериментов, приведенных выше, была создана модель прохождения лучей представленных сужений используя программное обеспечение (ПО) Tracerpro Opto-Mechanical Modeling [5] компании Lambda Research. Модель позволяет оценить и другие типы формируемых кончиков ОВ.

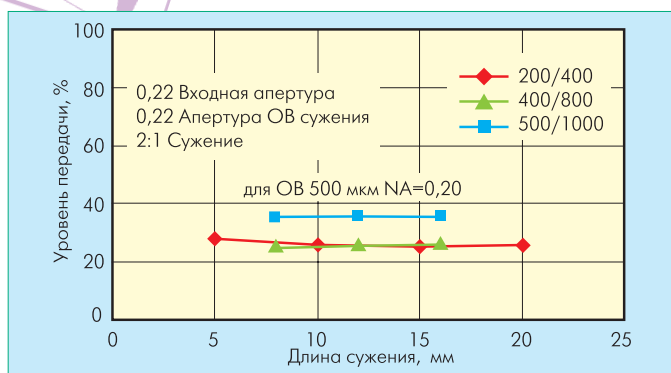


Рис. 7 Зависимость потерь от длины сужения для NA=0,22

Модель состоит из кварцевого ОВ с цилиндрической сердцевинкой и оболочкой, оптимизированного под NA=0,22. Вокруг оболочки размещен поглощающий буферный слой, аналогичный тому, что используется в ОВ компании Polymicro Technologies. Для удовлетворения условий, описанных в схеме тестирования, входное ОВ с сердцевинкой 400 мкм было соединено с ОВ с сердцевинкой 200 мкм, используя сужения различной длины (10, 15, 20 и 1000 мм). Для сужения каждой длины можно было менять входную апертуру источников света от 0,22 (полное заполнение ОВ) до 0,10. Выходные потери вычислялись на основе учета числа лучей, прошедших с выхода 200 мкм ОВ через эталонную плоскость, расположенную на расстоянии 50 мм. Такой анализ повторялся для каждого размера ОВ.

Моделирование зависимости потерь от NA

Модельные результаты оценки оптических потерь хорошо совпадают с экспериментальными. Это видно на рис.9, где такие результаты даны для сужений длиной 10, 15, 20 и 1000 мм. Интересным здесь является результат моделирования очень длинного (1000 мм) сужения, не использованного в экспериментах. Он также не показывает ощутимого уменьшения потерь по сравнению с малыми длинами, подтверждая выводы о независимости потерь от длины сужения.

Модель выхода на дальнем конце

Вычисление потерь осуществлялось путем сравнения исходного числа лучей, вышедших из источника (4681), с числом лучей, которые прошли через сужение, ОВ малого диаметра и попали на эталонную плоскость на выходе. ПО анализировало фактически карту энергетической яркости, формируемую лучами, падающими на эталонную плоскость. Примеры такой карты показаны на рис.10. Кольцевая структура карты (рис.10а) объясняется применением в модели конечного точечного источника, а также конечным числом используемых лучей. При большей длине сужения (1000 мм) кольцевая структура карты менее выражена (рис.10б). Это говорит о том, что длинное сужение создает более равномерное распределение излучения на выходе, чем короткое, хотя это мало влияет на характеристики потерь. Если источник на входе имеет

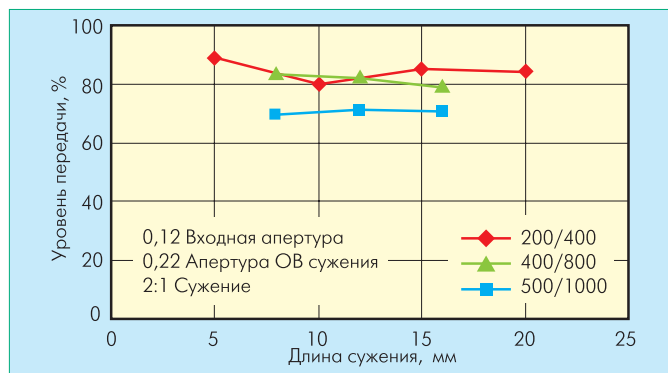


Рис. 8 Зависимость потерь от длины сужения для NA=0,12

достаточно равномерное распределение, то кольцевая структура не должна проявляться. В противном случае она проявляется, тогда длинные сужения и могут представить интерес.

Формируемые кончики очень удобны в медицине и промышленных приложениях, которые требуют доставки лазерного пучка большой мощности (при раскройке материала или разрезании живой ткани) или распределения света в большом объеме (при удалении ткани или фотодинамической терапии), или изменения расходимости пучка или размера фокусируемого пятна (при обработке материала и в оптических системах связи), или изменения направления оптического пучка относительно оси волокна в области ограниченного объема (при удалении или перфорации живой ткани).

Наиболее общими типами кончиков являются сужения, позволяющие уменьшить плотность мощности или увеличить диаметр сердцевинки ОВ, принимающего излучение. Поэтому важно было оценить фактические оптические потери в сужениях и их зависимость от входной NA, длины сужения и диаметра ОВ. Проведенные эксперименты с сужениями 200/400, 400/800 и 500/1000 мкм позволили получить такие оценки при степени сужения 2:1 и длине волны 0,633 мкм. Потери составили 5,9 дБ (уровень передачи 25%) для NA=0,22 и 0,8 дБ (уровень передачи 83%) для NA=0,12. Они сильно зависят от входной NA и слабо – от длины сужения и диаметра ОВ.

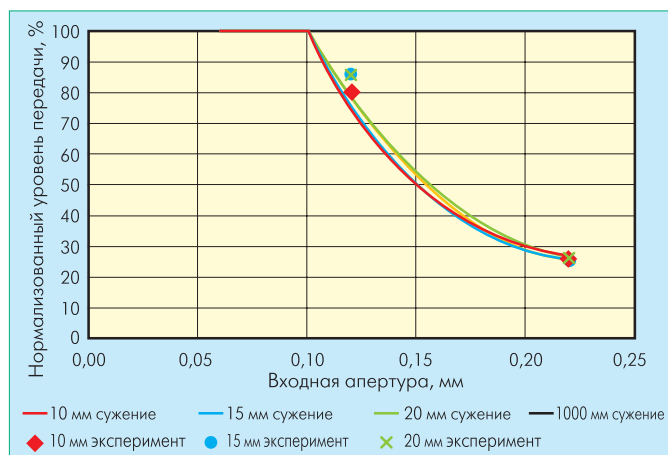


Рис. 9 Зависимость потерь от входной апертуры для сужений различной длины (оптическая модель+данные экспериментов)

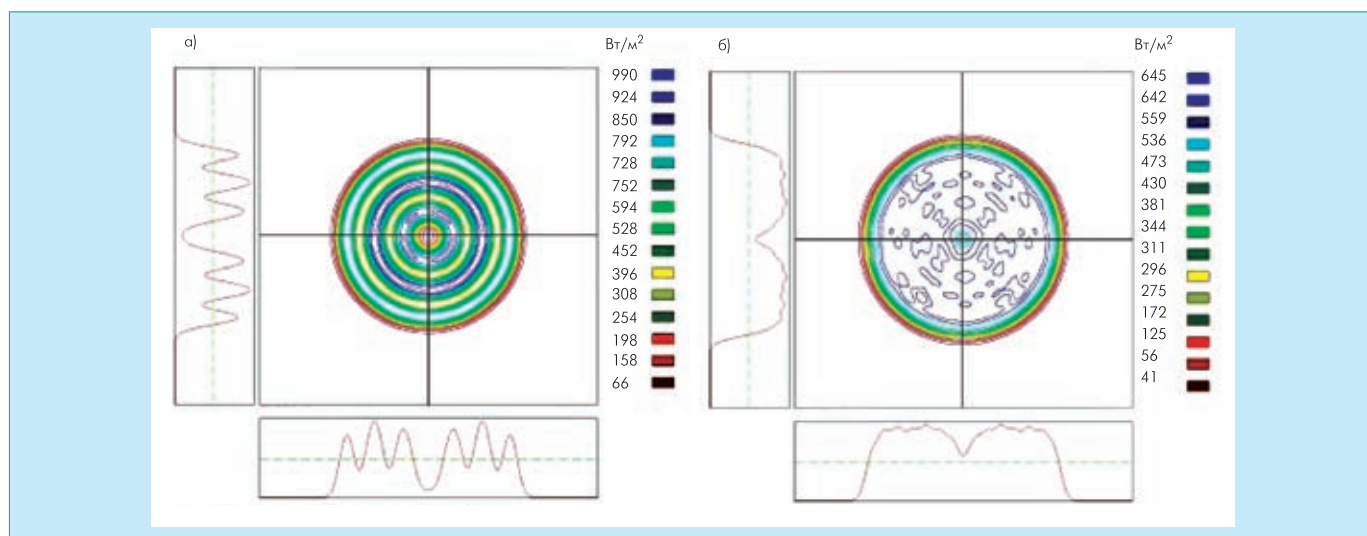


Рис.10 Карты энергетической яркости на дальнем конце в эталонной плоскости (входное $NA=0,22$) для короткого – 10 мм (а) и длинного – 1000 мм (б) сужений

Моделирование, проведенное на разработанной модели, подтвердило справедливость результатов экспериментов. Полученная модель может использоваться при проектировании, как сужений, так и других типов кончиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Clarkin J., Timmerman R., Shannon J.** Shaped Fiber Tips for Medical and Industrial Applications. – Proc. of SPIE, v.5317, Optical Fibers and Sensors for Medical Applications IV, ed. by I.Gannot. – SPIE, Bellingham, WA, 2004.

2. The Book of Polymicro Technologies, 2001, p.5.
3. **Hecht J.** Understanding Fiber Optics, 1999, p.573.
4. **Allard F.** Fiber Optics Handbook, 1989, p.356.
5. Tracepro. Software for Opto-Mechanical Modeling, Ver.2.3, Lambda Research Corp., 2001.

АВТОРЫ

James P. Clarkin, Richard J. Timmerman, John H. Shannon, – Polymicro Technologies, LLC, 18019 N. 25th Avenue, Phoenix, AZ 85023-1200