

УДК 681.7.068.4
PACS 42.81.-i

Волоконный световод с конусной линзой для ввода излучения в волновод малого диаметра

П.В. Карнаушкин^a, Р.С. Пономарев^a

^a Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15
email: pavelkarn@mail.ru

Работа посвящена технологии соединения чипа фотонной интегральной схемы (ФИС) с волоконным световодом (ВС). Рассматривается торцевая стыковка ВС с конусной линзой с волноводами малого диаметра. Проведены аналитический расчет при гауссовом приближении и моделирование линзованного ВС с конусной оболочкой для ввода излучения в волновод диаметром 3 мкм с помощью метода распространяющегося пучка. В результате аналитического расчета и моделирования получен оптимальный радиус кривизны конусной линзы на ВС для эффективного ввода оптического излучения в произвольный волновод с диаметром 3 мкм, который составил 8 – 16 мкм. С помощью технологии химического травления с последующим электродуговым оплавлением получен набор конусных линз на ВС с радиусом кривизны от 6 до 16 мкм. У всех полученных образцов методом поперечного сдвига в ближнем поле измерен диаметр поля моды, и методом интерферометра Фабри-Перо измерено фокусное расстояние. Полученные экспериментальные результаты с ошибкой не более 30 % подтвердили соответствие параметров изготовленных линз аналитическому расчету и результатам моделирования.

Ключевые слова: фотонная интегральная схема; линзованное волокно; конусная линза; диаметр поля моды; фокусное расстояние

Поступила в редакцию 07.03.2017; принята к опубликованию 11.05.2017

The optical fiber with a taper lens to light input into the waveguide of a small diameter

P. V. Karnaushkin^a, R. S. Ponomarev^a

^a Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm
email: pavelkarn@mail.ru

The work is devoted to the problem of the integration of the photonic integrated circuit with optical fiber. In the standard single mode fibers mode field diameter is greater than the mode field diameter in the waveguide in 3–10 times, so coupling of light has high losses. It was considered lateral coupling between lensed tapered fiber and a small diameter waveguide. It was performed an analytical calculation with the gaussian approximation and modelling of fiber tapered lens for input radiation into the waveguide using the method of propagating beam. As a result, the analytical calculation and simulation derived an optimum radius of curvature of the tapered lens for an effective input of optical radiation in an arbitrary waveguide with a diameter of 3 microns. Lensed tapered fibers were made up by chemical etching followed by arc melting technology and it was received a set of samples with a radius of curvature from 6 to 16 microns. Mode field diameter of samples

was measured by the transverse offset technique in the near field, and the focal length was measured by the method of the Fabry-Perot interferometer. The error of measured parameters is no more than 30%, and results are confirmed with analytical calculation and modeling.

Keywords: photonic integrated circuit; lensed fiber; tapered lens; mode field diameter; focus distance

Received 07.03.2017; accepted 11.05.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-1-54-64

1. Введение

В настоящее время одной из основных проблем в области интегральной оптики является проблема интеграции ФИС с волноводами малого диаметра на базе InP, SOI, Si₃N₄ в оптоволоконные сети [1]. В стандартных одномодовых ВС диаметр распространяющейся моды оптического излучения составляет около 10 мкм при длине волны излучения $\lambda=1.55$ мкм и превышает диаметр моды в волноводе интегральной схемы в 3 – 10 раз. Вследствие этого при стыковке значительная доля излучения входит в чип ФИС, минуя область волновода, что приводит к резкому возрастанию оптических потерь и паразитной засветке соседних волноводов (рис. 1).

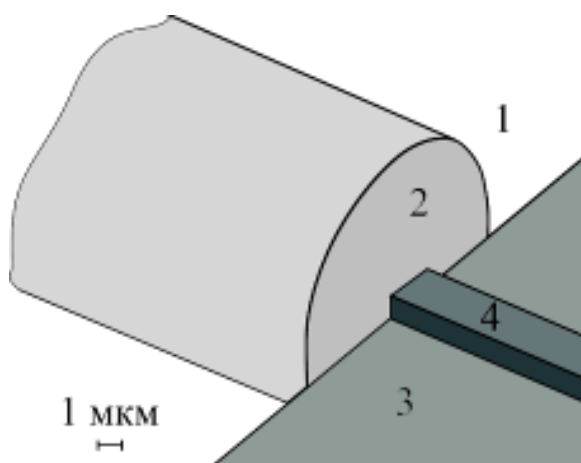


Рис. 1. Проблема торцевой стыковки ВС и волновода: 1 – оболочка ВС, 2 – сердцевина ВС, 3 – подложка ФИС, 4 – волновод ФИС

Для снижения оптических потерь при соединении ФИС с ВС обычно используются преобразователи моды. Преобразователь моды представляет собой волновод, размеры которого изменяются в направлении от чипа к ВС так, что происходит изменение ширины распространяющейся оптической моды. В случае, когда размеры изменяются плавно, происходит полная трансформация узкой моды в широкую, и такой преобразователь моды называется адиабатическим. С точки зрения теории лучшим преобразователем является трехмерный рупорный волновод (рис. 2), который горизонтально

и вертикально расширяет волновод в направлении от чипа к ВС [2].

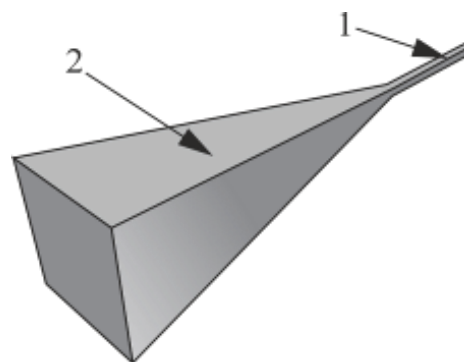


Рис. 2. Трехмерный рупорный волновод: 1 – волновод ФИС, 2 – трехмерный рупорный волновод

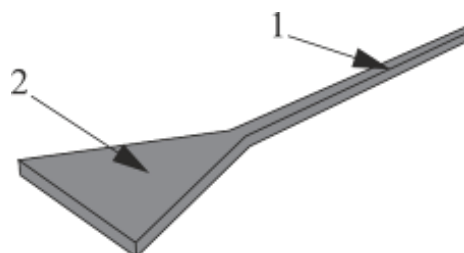


Рис. 3. Двухмерный рупорный волновод: 1 – волновод ФИС, 2 – двухмерный рупорный волновод

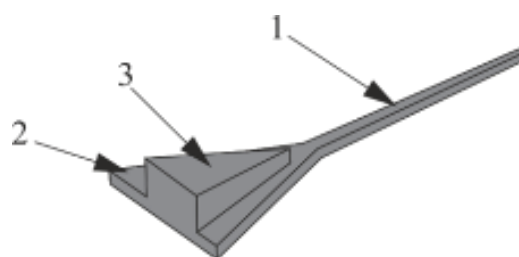


Рис. 4. Двухслойный рупорный волновод: 1 – волновод, 2 – двухмерный нижний рупорный волновод, 3 – двухмерный верхний рупорный волновод

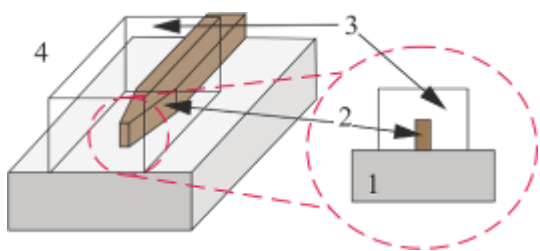


Рис. 5. Двухмерный инвертированный рупорный волновод, сформированный в ФИС на базе SOI: 1 – подложка из SiO_2 , 2 – двухмерный инвертированный рупорный волновод из Si, 3 – полимерный окружающий волновод, 4 – воздух

Длина адиабатического трехмерного рупорного волновода обычно составляет до нескольких миллиметров, что превышает размеры большинства чипов ФИС и является нетехнологичным. На практике вместо трехмерного рупорного волновода обычно используются двухмерные структуры (рис. 3), основным преимуществом которых является простота изготовления, а недостатком – трансформация моды только в одном направлении [3].

Промежуточным решением является двухслойный рупорный волновод, представляющий собой два двухмерных рупорных волновода (один поверх другого) (рис. 4) [4].

Недостатком двухслойного рупорного волновода является необходимость использовать как минимум два процесса травления для создания данной структуры в ходе производства ФИС. С практической точки зрения при торцевой стыковке наиболее актуальным преобразователем моды является двухмерный инвертированный рупорный волновод (рис. 5). Для эффективной работы такой рупорный волновод должен быть окружен волноводом с меньшим показателем преломления и с диаметром поля моды, соответствующим диаметру поля моды ВС. Оптическое излучение вводится из ВС в окружающий волновод, а затем в ходе распространения по нему перекачивается в инвертированный рупорный волновод. Как показано в [5, 6], в ФИС на базе SOI окружающий волновод может быть сформирован из полимера, или из SiON соответственно.

Рассмотренные выше преобразователи моды используются при торцевой стыковке ФИС и ВС. Их преимуществами являются: низкие потери (не выше 1 дБ), нечувствительность к поляризации, широкая полоса пропускания, а недостатками – сложность изготовления и чувствительность к смещениям относительно ВС.

Альтернативой торцевому соединению является вертикальная стыковка ФИС и ВС. В данном

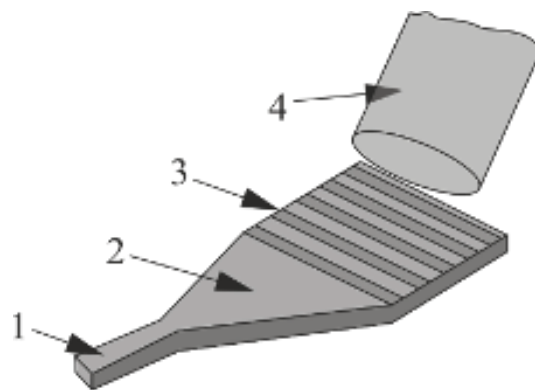


Рис. 6. Схема вертикального соединения ФИС и ВС с помощью решетчатого элемента: 1 – волновод, 2 – двухмерный рупорный волновод, 3 – решетка на поверхности рупорного волновода, 4 – ВС

случае преобразователем моды является двухмерный рупорный волновод с решеткой на поверхности [7], к которому под определенным углом подводится торец ВС (рис. 6). Преимуществами данной методики являются простота изготовления, низкая чувствительность к смещениям между ВС и преобразователем моды, а недостатками – высокая чувствительность к поляризации, узкая полоса пропускания и высокие оптические потери (обычно до 5 дБ [1]).

Все рассмотренные выше способы формирования переходных элементов требуют введения в конструкцию ФИС новых элементов, а в технологический процесс – новых производственных операций. Помимо преобразователей моды, сформированных на чипе ФИС, существует другой способ снизить потери при соединении ФИС и ВС – использовать высокоапертурные [8] и линзованные ВС. Высокоапертурные ВС в отличие от стандартных одномодовых ВС имеют высокий контраст показателей преломления между сердцевиной и оболочкой, в результате чего диаметр распространяющейся моды в таких ВС составляет около 5 мкм при $\lambda = 1.55$ мкм.

Данная работа посвящена линзованным ВС, как средству снижения потерь при соединении ФИС с ВС. Данный способ, позволяющий формировать переходные элементы, не внося изменений в конструкцию ФИС, является более универсальным и дешевым. В результате работы получены и проанализированы новые практические результаты, которые согласуются с рядом теоретических и экспериментальных работ.

2. Линзованные ВС

Линзованные волоконные световоды – это оптические компоненты, которые состоят из ВС и линзы, формируемой на торце этого световода [9]. Наиболее распространены линзованные ВС, конец которых имеет форму конусной линзы.

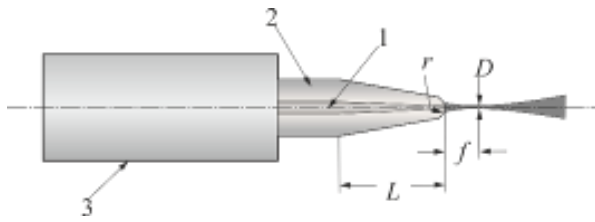


Рис. 7. Схема ВС с конусной линзой на торце: 1 – сердцевина ВС, 2 – оболочка ВС, 3 – защитно-упрочняющее покрытие, L – длина конусного участка, r – радиус кривизны линзы, f – фокусное расстояние, D – диаметр поля моды

Свет на выходе из таких линз фокусируется на конечном расстоянии, собираясь в узкий пучок с диаметром поля моды от 2 до 6 мкм [10]. Основными параметрами конусных линз являются: длина конусного участка L , радиус кривизны линзы r , фокусное расстояние f , диаметр поля моды (ДПМ) D и рабочая длина волны λ (рис. 7).

Применение ВС с конусными линзами способно сократить диаметр поля моды до 2 мкм и сфокусировать излучение на определенном расстоянии от торца световода. Данные свойства линзованных ВС позволяют вводить излучение строго в волновод без торцевого контакта. Целью данной работы являются аналитический расчет, моделирование и создание ВС с конусной линзой для эффективного ввода излучения в произвольный волновод диаметром 3 мкм, что соответствует типичным размерам волноводов на ФИС с высокой плотностью элементов.

Основными методами производства конусных линз на ВС являются: электродуговое или лазерное оплавление [11], химическое травление или полировка с последующим оплавлением [12, 13]. Важно учитывать, что во время электродугового и лазерного оплавления меняется геометрия сердцевин, в то время как полировка или химическое травление воздействуют только на внешнюю поверхность оболочки или сердцевин. Поэтому в первом случае получают линзованные ВС с конусной сердцевинкой, а во втором – с конусной оболочкой (рис. 8).

Фокусирующие свойства линзованных ВС с конусной оболочкой зависят от радиуса кривизны линзы r (рис. 7.), в то время как у ВС с конусной сердцевинкой – от r и геометрии конусного участка. В ходе данной работы исследовались только линзованные ВС с конусной оболочкой, что обусловлено малыми размерами и высокой сложностью

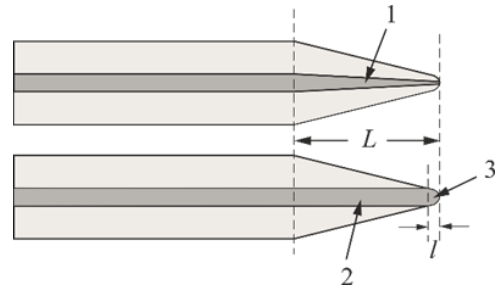


Рис. 8. Геометрия ВС с торцевыми линзами. Сверху – схема конусной линзы на ВС с конусной сердцевинкой, которая получена электродуговым или лазерным оплавлением, снизу – схема конусной линзы, полученной полировкой или травлением с последующим оплавлением: 1 – область конусной сердцевинки, 2 – область постоянной сердцевинки, 3 – линза, L – длина конусного участка, l – длина сегмента линзы

получения ВС с конусной сердцевинкой строго заданной геометрии.

3. Аналитический расчет и моделирование ВС с конусной линзой

Критерием эффективности передачи оптического излучения из волокна в волновод является коэффициент связи C , или интеграл перекрытия электромагнитных полей ВС и волновода [14]:

$$C = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_t \mathbf{e}_t dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_t \mathbf{e}_t^* dx dy \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{e}_t \mathbf{E}_t^* dx dy} \quad (1)$$

где $\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_0(x, y)e^{i(\alpha x - \beta z)}$ и $\mathbf{e}_t = \mathbf{e}_0(x, y)e^{i(\alpha x - \beta z)}$ – уравнения фундаментальных мод вдоль направления z в волноводе и ВС соответственно;

$\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}_0 \cdot e^{-\frac{R^2}{w_0^2}}$ и $\mathbf{e}_0 = \mathbf{e}_0 \cdot e^{-\frac{R^2}{w_0^2}}$ – поперечные распределения полей волновода и ВС в гауссовом приближении (рис. 9).

Гауссово приближение предполагает, что в силу осемимметричности световода поперечное распределение поля \mathbf{E} зависит только от радиальной координаты R , отсчитываемой от центра ВС. Из (1) следует, что для максимальной эффективности передачи оптического излучения фундаментальные моды, распространяющиеся в ВС и в волноводе, должны иметь одинаковую форму и близкие радиусы w_0 . Так как диаметр моды, распространяющейся в волноводе шириной 3 мкм, в силу законов электродинамики превышает размеры волновода и может составлять до 5 мкм, для эффективной передачи оптического излучения требуются линзованные ВС, способные создать пучок диаметром от 3 до 5 мкм.

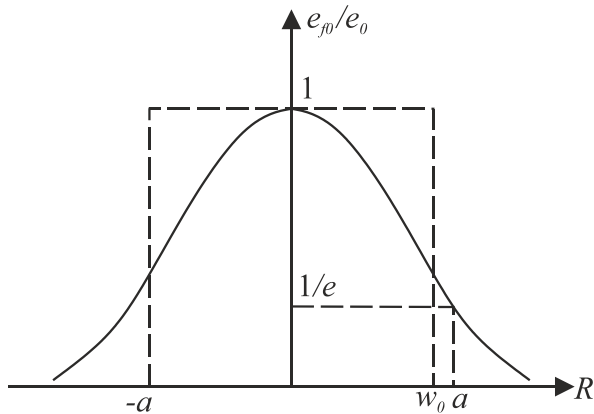


Рис. 9. Поперечное распределение поля фундаментальной моды в ВС при гауссовом приближении: w_0 – радиус поля моды, a – радиус ВС

3.1. Аналитический расчет

Так как ВС с конусными линзами представляют собой осесимметричные объекты, то для аналитического описания фокусирующих свойств возможно воспользоваться гауссовым приближением. В общем случае для гауссова пучка радиусом w_L , который распространяется в ВС и фокусируется линзой, справедливо соотношение [15]:

$$w_f^2 = \frac{w_L^2}{1 + \left(\frac{\pi w_L^2}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{n-1}{r} - \frac{n}{R_L}\right)^2}, \quad (2)$$

где w_f – радиус сфокусированного пучка, w_L – радиус пучка до фокусировки (рис. 10), λ – длина волны, n – показатель преломления сердцевинной оболочки, r – радиус кривизны линзы, R_L – радиус кривизны сферического (расходящегося или сходящегося) волнового фронта.

В случае линзованного ВС с конусной сердцевинной оболочкой из-за нарушения условий распространения происходит трансформация сердцевинной моды в ряд оболочечных мод, из-за чего оценка w_L затруднена.

В линзованном ВС с конусной оболочкой нет нарушения локального распространения сердцевинной моды, поэтому отсутствует трансформация мод, R_L равен бесконечности, а соотношение (2) принимает вид:

$$w_f^2 = \frac{w_L^2}{1 + \left(\frac{\pi w_L^2 (n-1)}{\lambda r}\right)^2}, \quad (3)$$

Таким образом, для кварцевого одномодового ВС на длине волны 1.55 мкм, с показателем преломления $n = 1.468$, радиусом поля моды $w_L = 5$ мкм зависимость $w_f = F(r)$ имеет вид, представленный на рис. 11.

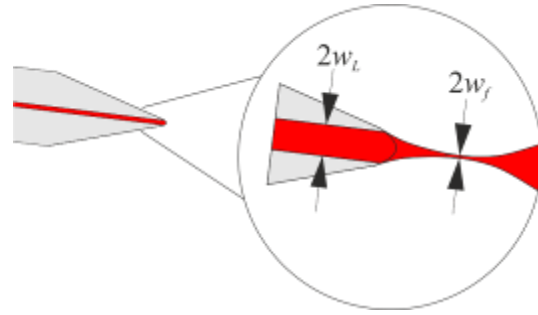


Рис. 10. Распространение излучения в линзованном волокне с конусной оболочкой: w_L – радиус гауссова пучка в ВС, w_f – радиус сфокусированного гауссова пучка

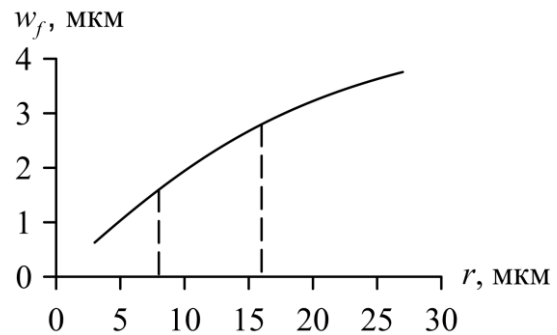


Рис. 11. График зависимости $w_f = F(r)$ для линзованного ВС с конусной оболочкой, выделена целевая область с r от 8 до 16 мкм

Из зависимости $w_f = F(r)$ для получения пучка с диаметром поля моды от 3 до 5 мкм требуется линзованное волокно с $r = 8 - 16$ мкм.

3.2. Моделирование

Для преодоления ограничения аналитического расчета – гауссова приближения, было выполнено математическое моделирование распространения излучения в конусной линзе ВС.

В ходе моделирования с помощью метода распространяющегося пучка (МРП) проведен анализ распространения оптического излучения в волокне с конусной линзой. МРП заключается в решении скалярного волнового уравнения путем многократного применения эволюционного алгоритма по длине ВС, поле при этом рассчитывается с помощью двумерного ряда Фурье с конечным числом членов [16]. Критериями применимости метода МРП являются: слабоизменяющиеся волноводные структуры, отсутствие отражений и низкий контраст показателей преломления, что соответствует условиям решаемой задачи.

В ходе численного эксперимента варьировались радиус кривизны линзы r и длина конусного сегмента L , вычислялись диаметр поля моды D и

фокусное расстояние f . ДПМ определялся как расстояние между точками, в которых амплитуда поля E падала в e раз, а фокусное расстояние – как расстояние между краем линзы и точкой, в которой амплитуда E максимальна (рис. 12).

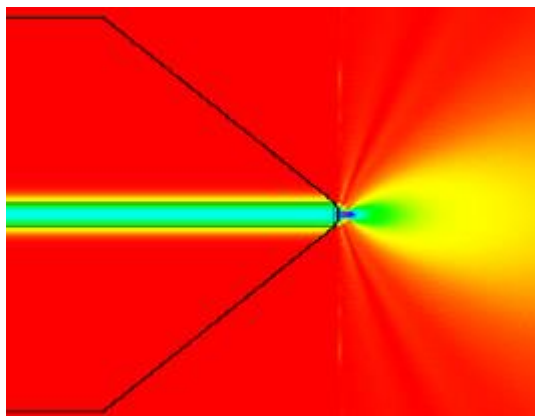


Рис. 12. Пример распределения амплитуды поля E на выходе из конусной линзы

По результатам моделирования были построены зависимости $D = F(r)$ и $f = F(r)$ (рис. 13).

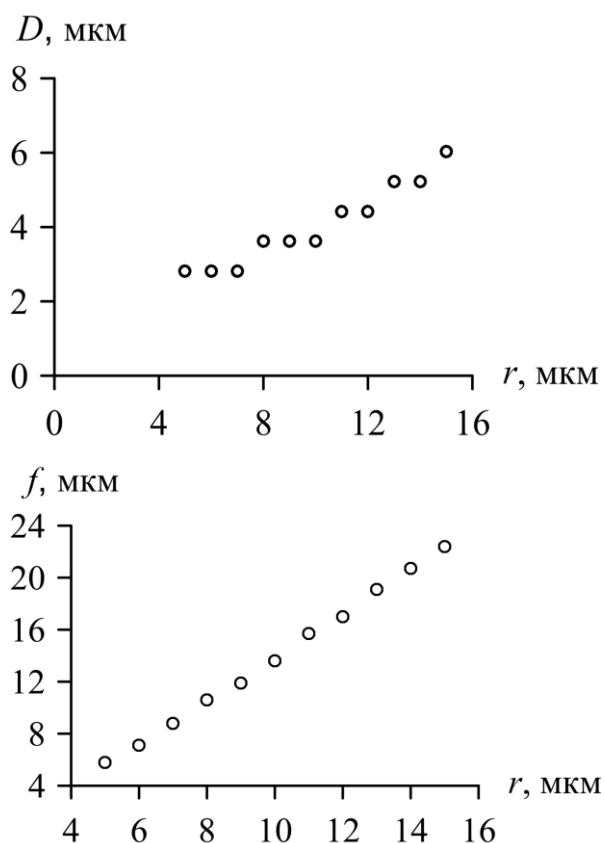


Рис. 13. Графики зависимостей $D = F(r)$ и $f = F(r)$ для линзованного ВС с длиной конусного участка $L = 250$ мкм

Исходя из полученных данных для получения пучка с ДПМ от 3 до 5 мкм r должен составлять от 6 до 15 мкм, при этом фокусное расстояние f лежит в пределах от 10 до 16 мкм. Также было установлено, что длина конусного сегмента L не влияет на результат.

4. Изготовление конусной линзы на ВС и измерение параметров

4.1. Изготовление конусной линзы

Для производства конусной линзы на торце ВС использовалась технология химического травления с последующим электродуговым оплавлением, которая подробно рассмотрена в [17]. Был выбран одномодовый ВС SMF-28, оплавление проводилось с помощью аппарата для сварки оптического волокна Fujikura FSM-100P. В результате был получен набор образцов конусных линз на ВС с r от 6 до 16 мкм и длиной конусного участка L от 140 до 250 мкм (рис. 14.).

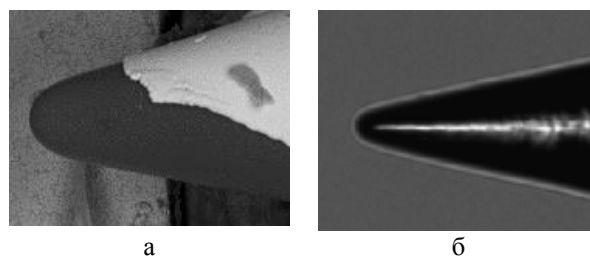


Рис. 14. Конусные линзы на ВС, полученные с помощью химического травления с последующим электродуговым оплавлением: а – $r = 16$ мкм (SEM 20 кВ), б – $r = 8$ мкм (Fujikura FSM-100P)

4.2. Измерение ДПМ методом поперечного сдвига в ближнем поле

ДПМ – это расстояние между точками гауссового распределения фундаментальной моды волновода, в которых мощность сигнала падает в e^2 раз. Для измерения ДПМ использовался метод поперечного сдвига в ближнем поле [18, 19], на основе которого была собрана автоматизированная экспериментальная установка (рис. 15).

Для определения ДПМ зонд 2 смещался вдоль горизонтальной и вертикальной осей относительно исследуемого образца 5 с шагом от 0.25 мкм (рис. 16) с регистрацией мощности излучения в каждом положении, после чего строился график зависимости мощности прошедшего излучения от смещения между сканирующим зондом и измеряемым ВС с конусной линзой.

По графику определялся ДПМ, как расстояние между точками, в которых мощность сигнала падала в e^2 раз (рис. 17).

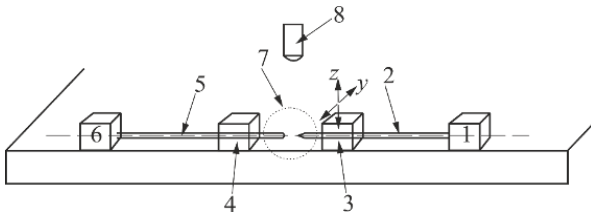
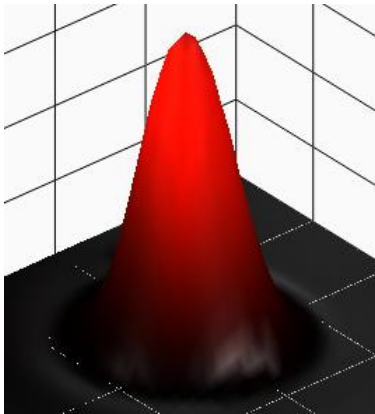


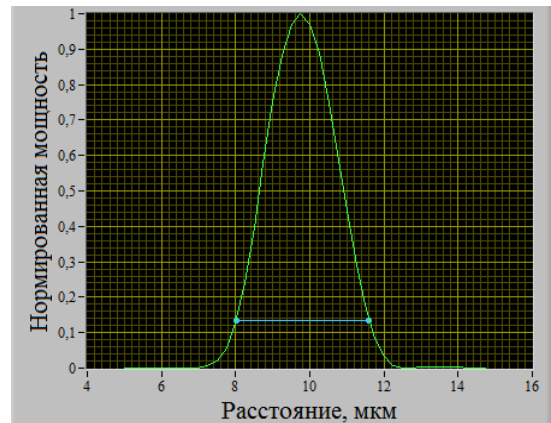
Рис. 15. Схема измерения диаметра поля моды методом поперечного сдвига в ближнем поле: 1 – лазер, 2 – сканирующий зонд, 3, 4 – подвижки, 5 – исследуемый образец, 6 – измеритель мощности, 7 – место стыковки зонда и образца на фокусном расстоянии образца, 8 – камера системы технического зрения



Рис. 16. Фотография области стыковки зонда и образца, полученная с помощью системы технического зрения. Слева – зонд, справа – исследуемый образец с $r = 5$ мкм и $L = 240$ мкм



а



б

Рис. 17. Результаты измерения ДПМ у образца с $r = 8$ мкм: а – трехмерное изображение моды, полученной в результате измерения; б – результат определения ДПМ

4.3. Измерение фокусного расстояния методом интерферометра Фабри–Перо

Фокусное расстояние конусных линз на ВС измерялось с помощью метода интерферометра Фабри–Перо, схема которого представлена на рис. 18 [18, 20].

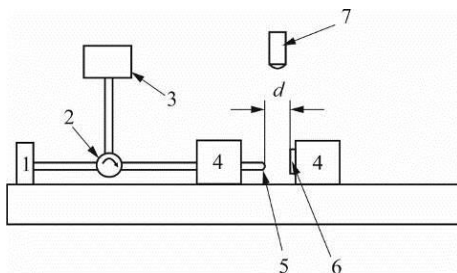


Рис. 18. Схема измерения фокусного расстояния методом интерферометра Фабри–Перо: 1 – источник излучения, 2 – оптический циркулятор, 3 – измеритель оптической мощности, 4 – подвижки, 5 – конусная линза, 6 – зеркало на расстоянии d от линзы, 7 – камера системы технического зрения

Свет с длиной волны $\lambda = 1,55$ мкм из источника излучения 1 попадал в циркулятор 2, конец которого был закреплен на 4 — позиционере с микрометром. Выходя из линзы на конце ВС 5, свет отражался в зеркале 6, а после перенаправлялся циркулятором на измеритель оптической мощности 3. Система технического зрения 7, состоящая из персонального компьютера и камеры, позволяла отслеживать момент касания конусной линзой зеркала 6. Приняв за нулевое положение линзы то, где она касалась зеркала, линза отодвигалась микропозиционером в новые положения с шагом 50 нм. Для каждого положения измеритель оптической мощности регистрировал мощность отраженного сигнала. Затем строился график зависимости нормированной мощности отраженного излучения от расстояния между линзой и зеркалом, по которому определялось положение пика мощности, соответствующее $f/2$ (рис. 19).

Как видно из рис. 19, в результате отражения излучения от зеркала и от края ВС наблюдалась характерная интерференционная картина.

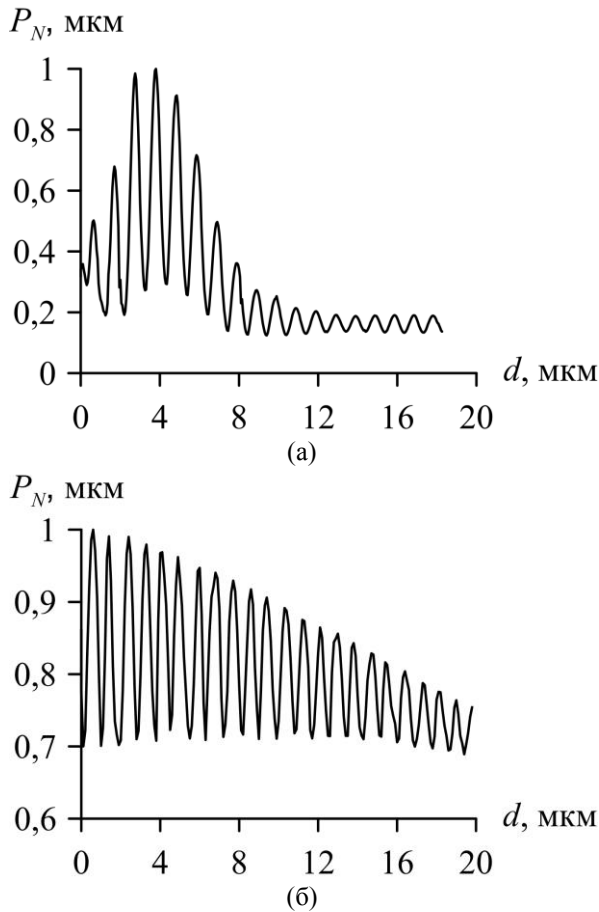


Рис. 19. Зависимость нормированной отраженной мощности излучения P_N от расстояния между образцом и зеркалом d : а – ВС с конусной линзой, б – ВС, сколотый под прямым углом

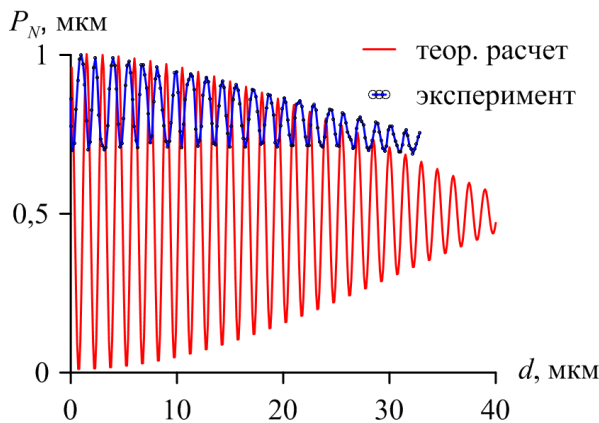


Рис. 20. Теоретическая и экспериментальная зависимости нормированной отраженной мощности P_N от разности хода l для сколотого волокна

Для расчета интерферометра Фабри–Перо удобно воспользоваться следующим выражением, учитывающим длину когерентности источника [20]:

$$I = 2I_0 \left(1 + \frac{\sin \varepsilon}{\varepsilon} \cos \left(2 \frac{l_c}{\lambda} \varepsilon \right) \right), \quad (4)$$

где I – интенсивность света в результате интерференции, I_0 – начальная интенсивность света, $\varepsilon = \pi l/l_c$, l – разность хода, $l_c = \lambda^2/\Delta\lambda$ – длина когерентности, λ – длина волны, $\Delta\lambda$ – ширина спектральной полосы.

Результаты расчета для суперлюминесцентного светодиода при токе накачки 150 мА с $\lambda = 1.5$ мкм и $\Delta\lambda = 50$ нм представлены на рис. 20.

Как видно из рис. 20, экспериментальная кривая отличается от кривой, полученной в результате теоретического расчета. Это объясняется тем, что в ходе эксперимента перемещение ВС относительно зеркала происходило с систематической погрешностью, и реальная величина шага позиционера была больше номинальной. Расчетная ошибка в величине шага составила около 15 %. На высокую погрешность позиционера также указывают различная ширина, неровности пиков экспериментальных данных.

Однако, несмотря на возникающую интерференционную картину, данная методика позволила оценить фокусное расстояние конусных линз (см. таблицу).

4.4. Результаты

Результаты моделирования, а также измерений ДПМ и фокусных расстояний представлены в таблице.

Параметры конусных линз на ВС, которые получены с помощью химического травления с последующим электродуговым оплавлением

r , мкм	D , мкм				f , мкм	
	Расч.	Мод.	Эк-т. D_x	Эк-т. D_y	Мод.	Эк-т.
6	2.4	2.8	1.9	2.9	7	9
8	3.2	3.6	2.5	3.5	11	10
12	4.5	4.4	3.8	4.6	17	16
16	5.7	5.9	5.5	5.0	24	22

Примечание: D_y и D_z – ДПМ вдоль осей y и z , f – фокусное расстояние, r – радиус кривизны линзы

Как видно из таблицы, экспериментальные значения параметров линз близки к значениям, полученным аналитически и численно. Важно отметить, что на разброс в значениях ДПМ вдоль разных осей влияют, во-первых, ошибки используемого трехосевого позиционера Thorlabs Nanomax 301, который в силу несовершенства конструкции имеет различную погрешность для вертикальной и горизонтальной осей, во-вторых, эллиптическая форма получаемых пучков, обусловленная некоторой несимметричностью полученных конусных линз.

5. Заключение

В ходе данной работы рассмотрено одно из актуальных решений проблемы интеграции фотонной интегральной схемы с волноводом малого диаметра в оптоволоконные сети – торцевая стыковка с линзованным ВС. В ходе теоретического расчета и моделирования установлено, что основным параметром, влияющим на фокусирующие свойства линзованного волокна с конусной оболочкой, является радиус кривизны r , который должен лежать в пределах от 6 до 16 мкм. Экспериментальные результаты отлично согласуются с теорией и расчетом. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что для ввода излучения в фотонную интегральную схему с волноводом 3 мкм понадобится ВС с конической линзой, имеющей r от 8 до 15 мкм.

Работа выполнена в рамках проекта № 02.G25.31.0113 «Разработка базовой технологии и создание производства фотонных интегральных схем для приборов, систем и комплексов оптоэлектронного навигационного приборостроения», реализуемого ПАО «ПНППК» совместно с ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Kopp C., Bernabe S., Ben Bakir B. et al. Silicon Photonic Circuits: On-CMOS Integration, fiber optical coupling, and packaging // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2011. Vol. 17. N. 3. P. 498–509.
2. Sure A., Dillon. T., Murakowski J., Lin C., Pustai D., and Prather D. W. Fabrication and characterization of three-dimensional silicon tapers // Optics Express. 2003. Vol. 11. N. 26. P. 3555–3561.
3. Kasaya K., Mitom O., Naganuma M., Kondo Y., Noguchi Y. A Simple Laterally Tapered Waveguide for Low-Loss Coupling to Single-Mode Fibers // IEEE Photonics Technology Letters. 1993. Vol. 5. N. 3. P. 345–347.
4. Dai D., He S. Bilevel Mode Converter Between a Silicon Nanowire Waveguide and a Larger Waveguide // Journal of Lightwave Technology. 2006. Vol. 24. N. 6. P. 2428–2433
5. Maegami Y., Takei R., Omoda E., Amano T., Okano M., Mori M., Kamei T., Sakakibara Y. Spot-size converter with a SiO₂ spacer layer between tapered Si and SiON waveguides for fiber-to-chip coupling // Optics Express. 2015. Vol. 23. N. 16. P. 21287–21295.
6. Shoji T., Tsuchizawa T., Watanabe T., Yamada K., Morita H. Low loss mode size converter from 0.3µm square Si wire waveguides to singlemode fibres // Electronics Letters. 2002. Vol. 38. N. 25. P.1669–1670.
7. Taillaert D, Laere F., Ayre I M., Bogaerts W., Van Thourhout D, Bienstman P., Baets R.. Grating Couplers for Coupling between Optical Fibers and Nanophotonic Waveguides // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45. N. 45A. P. 6071–6077.
8. Skutnik B., Foley B. Improved optical fibers for enhanced coupling with high power diode lasers // Proceedings SPIE. 2004, vol. 5336, High-Power Diode Laser Technology and Applications II, 65.
9. Ukrainczyk L., Vastag D. L. Thermally-formed lensed fibers. Patent No.: US 2003/0053751 A1 G02B 6/32. . 20.03.2003. P. 1–13.
10. Guttman J. L. Mode-Field Diameter and “Spot Size” Measurements of Lensed and Tapered Specialty Fibers. [Электронный ресурс]. Ophir Photonics Group. URL: http://www.ophiropt.com/user_files/laser/beamprofilers/MFDandSpotSize.pdf (дата обращения: 03.03.2017).
11. Malki A., Bachelo R., Van Lauwe F. Two-step process for micro-lens-fibre fabrication using a continuous CO₂ laser source // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2001. Vol. 3. P. 291–295.
12. Barnard C. W., Lit J. W. Single-mode fiber micro-lens with controllable spot size // Applied optics. 1991. Vol. 30. N. 15. P. 1958–1962.
13. Tsa Y.-C., Liu Y.-D., Cao C.-L. et al. A new scheme of fiber end-face fabrication employing a variable torque technique // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2008. Vol. 18. P. 1–7.
14. Lefevre H. Fiber-optic gyroscopes // Artech house. 1995. 332 p.
15. Barnard C. W., Lit J. W. Mode transforming properties of tapered single-mode fiber microlenses // Applied Optics. 1993. Vol. 32. N. 12. P. 2090–2094.
16. Адамс М.. Введение в теорию оптических волноводов // Мир. 1984. С. 473–474.
17. Карнаушкин П. В., Пономарев П. С., Салгаева У. О., Шкляева Е. В., Игнатенко Е. А. Производство конусов и конусных линз на оптических волокнах и измерение их параметров // Вестник молодых ученых ПГНИУ . 2016. Вып. 6. С. 144–154. [Электронный ресурс] (дата обращения: 03.03.2017)
18. ГОСТ Р МЭК 793-1-93. Волокна оптические. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1994. 108 с.
19. Li E. Characterization of a fiber lens // Optics letters. 2006. Vol. 31. N. 2. P. 169–171.
20. Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо. [Электронный ресурс]. URL: http://physics.nad.ru/Physics/Cyrillic/ifp_txt.htm (дата обращения: 03.03.2017)

References

1. Kopp C., Bernabe S., Ben Bakir B. et al. Silicon Photonic Circuits: On-CMOS Integration, fiber optical coupling, and packaging. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*. 2011, vol. 17, no. 3, pp. 498–509.
2. Sure A., Dillon. T, Murakowski J., Lin C., Pustai D., and Prather D. W. Fabrication and characterization of three-dimensional silicon tapers. *Optics Express*. 2003, vol. 11, no. 26, pp. 3555–3561.
3. Kasaya K., Mitom O., Naganuma M., Kondo Y., Noguchi Y. A simple laterally tapered waveguide for low-loss coupling to single-mode fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1993, vol. 5, no. 3, pp. 345–347.
4. Dai D., He S. Bilevel mode converter between a silicon nanowire waveguide and a larger waveguide. *Journal of Lightwave Technology*. 2006, vol. 24, no. 6, pp. 2428–2433
5. Maegami Y., Takei R., Omoda E., Amano T., Okano M., Mori M., Kamei T., Sakakibara Y. Spot-size converter with a SiO₂ spacer layer between tapered Si and SiON waveguides for fiber-to-chip coupling. *Optics Express*. 2015, vol. 23, no. 16, pp. 21287–21295.
6. Shoji T., Tsuchizawa T., Watanabe T., Yamada K., Morita H. Low loss mode size converter from 0.3µm square Si wire waveguides to singlemode fibres. *Electronics Letters*. 2002, vol. 38, no. 25, pp. 1669–1670.
7. Taillaert D, Laere F., Ayre1 M., Bogaerts W., Van Thourhout D, Bienstman P., Baets R. Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2006. Vol. 45. N. 45A. P. 6071–6077.
8. Skutnik B., Foley B. Improved optical fibers for enhanced coupling with high power diode lasers. *Proceedings SPIE*. 2004, vol. 5336, High-Power Diode Laser Technology and Applications II, 65.
9. Ukrainczyk L., Vastag D. L. *Thermally-formed lensed fibers*. Patent No.: US 2003/0053751 A1 G02B 6/32. . 20.03.2003. P. 1–13.
10. Guttman J. L. *Mode-field diameter and “spot size” measurements of lensed and tapered specialty fibers*. Ophir Photonics Group. URL: http://www.ophiropt.com/user_files/laser/beam_profilers/MFDandSpotSize.pdf
11. Malki A., Bachelo R., Van Lauwe F. Two-step process for micro-lens-fibre fabrication using a continuous CO₂ laser source. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2001, vol. 3, pp. 291–295.
12. Barnard C. W., Lit J. W. Single-mode fiber micro-lens with controllable spot size. *Applied Optics*. 1991, vol. 30, no. 15, pp. 1958–1962.
13. Tsa Y.-C., Liu Y.-D., Cao C.-L. et al. A new scheme of fiber end-face fabrication employing a variable torque technique. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2008, vol. 18, pp. 1–7.
14. Lefevre H. *The Fiber-optic gyroscopes*. Artech house. 1995. 332 p.
15. Barnard C.W., Lit J.W. Mode transforming properties of tapered single-mode fiber microlenses. *Applied optics*. 1993, vol. 32, no. 12, pp. 2090–2094.
16. Adams M. J. *An Introduction to Optical Waveguide*. New-York: Wiley. 1981. 401 p.
17. Karnauushkin P. V., Ponomarev R. S., Salgaeva U. O., Shklyayeva E. V., Ignatenko E. A. Production of tapers and taper lenses on optical fibers and measurement of their parameters. *Young Scientists Bulletin of Perm State University*. 2016, vol. 6, pp. 144–154 (In Russian).
18. State Standard R MEK 793-1-93. *Volokna opticheskie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia* (Optic fibers. Common specifications). Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1994, 108 p. (In Russian).
19. Li E. Characterization of a fiber lens. *Optics letters*. 2006, vol. 31, no. 2, pp. 169–171.
20. *Volokonno-opticheskii interferometr Fabry–Pérot* (Fiber optics Fabry–Pérot interferometer). URL: http://physics.nad.ru/Physics/Cyrillic/ifp_txt.htm (In Russian)

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Карнаушкин П. В., Пономарев Р. С. Волоконный световод с конусной линзой для ввода излучения в волновод малого диаметра // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 1 (35). С. 54–63. doi: 10.17072/1994-3598-2017-1-54-63

Please cite this article in English as:

Karnauushkin P. V., Ponomarev R. S. The optical fiber with a taper lens to light input into the waveguide of a small diameter. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 1 (35), pp. 54–63. doi: 10.17072/1994-3598-2017-1-54-63