

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДОВОГО УПЛОТНЕНИЯ В КАСКАДНОЙ СХЕМЕ УПЛОТНЕНИЯ ДАННЫХ В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

© 2012 г. Д. В. Свистунов, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

E-mail: svistunov@mail.ru

При проведении оценки использованы результаты экспериментального исследования опытных образцов ключевого элемента планарного устройства селективного возбуждения многомодовых оптических волокон. Анализ полученных результатов подтверждает работоспособность этого устройства в пределах так называемого Основного диапазона “О” спектрального уплотнения данных. Это свидетельствует о возможности построения трехступенчатой каскадной схемы уплотнения данных в многомодовых волоконно-оптических линиях связи и локальных сетях. В этой схеме на первой ступени применяется метод временного уплотнения данных, на второй ступени – спектральное уплотнение, на третьей – модовое уплотнение данных. Такая каскадная схема позволит многократно увеличить информационную емкость как новых, так и созданных в последнее десятилетие многомодовых волоконных систем.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, локальные сети, уплотнение данных, модовое уплотнение, селективное возбуждение мод.

Коды OCIS: 060.2330, 060.4230, 060.4250, 130.3120

Поступила в редакцию 15.04.2011

Введение

Принцип модового уплотнения данных состоит в использовании разных групп мод многомодового оптического волокна (ОВ) в качестве независимых информационных каналов в многомодовых волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), широко распространенных в местных линиях и локальных сетях. Применение этого метода сдерживалось наличием сильной взаимной связи мод в выпускавшихся прежде ОВ. Однако прогресс в технологии изготовления многомодовых ОВ позволил значительно снизить уровень межмодовой связи. Так измерения коэффициента взаимной связи мод в современном ОВ, проведенные в наиболее неблагоприятном случае мод соседних порядков, имели результатом средний для серии образцов коэффициент, равный $0,007 \text{ км}^{-1}$, и его максимальное значение $0,02 \text{ км}^{-1}$ [1]. Этот прогресс явился основанием для проведения в последнее десятилетие работ по передаче информации по отдельной моде многомодового ОВ. Цель этих исследований – повышение информационной емкости многомодовых ВОЛС путем увеличения их коэффициента широко-

полосности. В ряде исследований экспериментально продемонстрировано сохранение одномодового режима передачи оптического сигнала по многомодовому ОВ на дистанциях до нескольких километров, в том числе в коммерческих ОВ (например, [2–4]). Эти практические подтверждения низкого уровня межмодовой связи в современных ОВ позволяют рассчитывать на дальнейшее повышение пропускной способности многомодовых ВОЛС малой и средней дальности, а также локальных сетей, путем применения метода модового уплотнения. Кроме того, при совместном использовании модового и других известных методов уплотнения данных может быть дополнительно получено многократное увеличение информационной емкости ВОЛС. Оценка практической возможности такой комбинации методов уплотнения и является предметом данной работы.

Каскадная схема уплотнения данных

Рассмотрим возможность практической реализации трехступенчатой каскадной схемы уплотнения данных в ВОЛС с применением

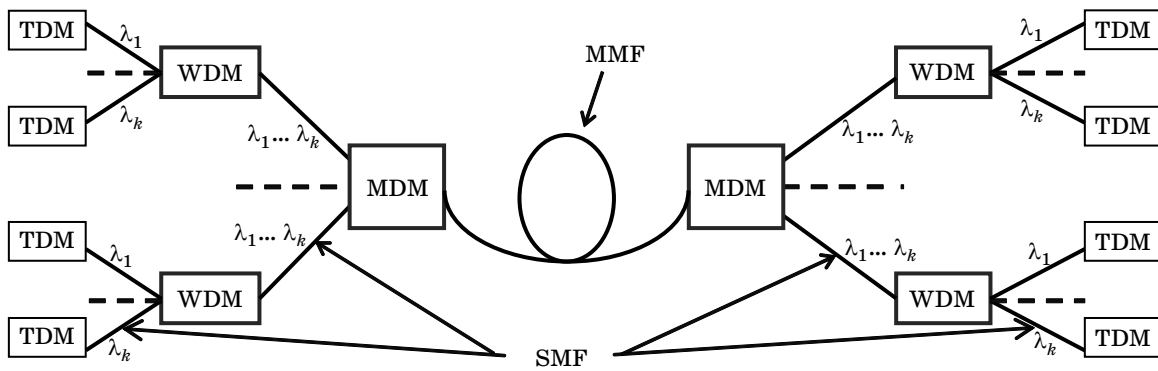


Рис. 1. Перспективная каскадная схема уплотнения данных в многомодовых ВОЛС. MMF – многомодовое ОВ, SMF – одномодовые ОВ, TDM, WDM, MDM – устройства временного, спектрального и модового уплотнений соответственно.

модового уплотнения на конечной стадии при использовании известных спектрального и временного методов уплотнения для каждого модового информационного канала. Блок-схема такого каскадного уплотнения данных показана на рис. 1.

На первой ступени этой каскадной схемы должен использоваться метод временного уплотнения для компрессии данных в каждом спектральном канале. На второй ступени применяется спектральное уплотнение данных, когда разные спектральные каналы объединяются в одномодовом ОВ. На третьей ступени используется метод модового уплотнения. На этой стадии весь информационный поток, передаваемый каждым одномодовым ОВ, вводится в отдельную моду многомодового ОВ. В приемной части блок-схемы в обратном порядке проводится детектирование отдельных исходных потоков информации.

Важнейшим элементом такой перспективной системы является модовый мультиплексор/демультиплексор, который должен обеспечивать селективное возбуждение и детектирование мод разных порядков. В последнее время разработан целый ряд таких элементов (например, [5–9]), и некоторые из них находятся на стадии экспериментального исследования опытных образцов. Это позволяет рассчитывать на создание в ближайшее время готовых к практическому применению коммерческих устройств.

Возможность сочетания модового и временного методов уплотнения данных сомнений не вызывает, поскольку каждый модовый канал является, по сути, аналогом отдельного одно-

модового ОВ, для которого временное уплотнение успешно применяется на практике. Поэтому рассмотрим практическую возможность совместного использования модового и спектрального методов уплотнения.

Очевидно, что реализуемость рассматриваемой каскадной схемы зависит от способности оптических устройств селективного возбуждения/детектирования мод эффективно работать в некотором спектральном диапазоне. Оценку этой способности проведем на примере предложенного в работах [7, 8] интегрально-оптического устройства селективного возбуждения мод трехмерного оптического волновода. Как и большинство разработанных модовых мультиплексоров/демультиплексоров, это устройство является внешним по отношению к ОВ и должно быть оптически согласовано с ним непосредственной стыковкой или через градиентные микролинзы. При этом принципы работы и конструкция модового мультиплексора задают тип возбуждаемых мод ОВ. Так мультиплексоры на базе голографических или дифракционных элементов способны возбуждать любые, поперечные или азимутальные, моды ОВ. Другие мультиплексоры построены на канальных или полосковых волноводах, в которых часто ширина в несколько раз больше их толщины, равной толщине одномодового планарного волновода. Моды волноводов таких мультиплексоров представлены поперечными модами квази-TE, TM, и при осевой стыковке они преимущественно возбуждают поперечные моды ОВ (и наоборот, эффективность возбуждения этих мод волновода азимутальными модами ОВ мала по сравнению с воз-

буждением поперечными модами ОВ). Для осевого согласования мультиплексора и ОВ следует использовать оптический узел из двух градиентных линз, каждая из которых одним торцом контактирует с одной из стыкуемых структур [10]. При этом увеличение поперечных размеров стыкуемых световых пучков приводит к значительному увеличению допусков на поперечные смещения. Для крепления линз можно использовать детали волоконных коннекторов. Эти коннекторы обеспечивают пренебрежимо малое осевое рассогласование, а поперечное смещение не превышает в среднем 0,3–0,4 мкм [11], что составляет малые доли процента от светового диаметра линз. Это позволяет рассчитывать на возбуждение модами мультиплексора соответствующих мод ОВ при малом уровне возбуждения паразитных азимутальных и поперечных мод других порядков.

Общая схема рассматриваемого интегрально-оптического устройства, содержащего каналные волноводы (КВ) и планарный селективный элемент связи, показана на рис. 2.

Селективный элемент связи включает в себя разделенные зазором многомодовый КВ и одномодовый планарный участок. По принципу действия этот планарный элемент относится к группе интегрально-оптических продольных элементов связи, примерами которых являются известные дифракционные и призмные устройства. Как и любое пассивное оптическое устройство, рассматриваемый планарный элемент демонстрирует обратимость действия и может использоваться как для детектирования, так и для селективного возбуждения мод

КВ, оптически согласуемых с соответствующими модами многомодового ОВ.

В режиме детектирования мод многомодового КВ в планарной структуре элемента возбуждаются планарные волноводные световые пучки, каждый из которых оптически связан с определенной модой КВ. Эти пучки распространяются в планарном волноводе (ПВ) по разным направлениям, которые можно определить из условия фазового согласования канальных и планарной мод в элементе связи

$$N_m \cos \alpha_{ij} = N_{ij}, \quad (1)$$

где N_m и N_{ij} – эффективные показатели преломления (ЭПП) планарной и канальных мод соответственно, ij – обозначение порядка канальной моды, α_{ij} – угол наклона планарного пучка к многомодовому КВ внутри образца. Планарные пучки оптически связаны рупорными переходами с модами выходных одномодовых КВ и через них с модами одномодовых ОВ.

Этот планарный квазипризмный элемент связи является ключевым элементом селективного устройства возбуждения/детектирования мод, а его характеристики определяют работоспособность всего устройства в целом. Поэтому для определения возможности применения этого устройства в каскадной схеме с использованием спектрального уплотнения данных требуется рассмотреть вопрос о работоспособности квазипризмного селективного планарного элемента связи в спектральном диапазоне, используемом в ВОЛС и локальных сетях.

Исследование селективного элемента

Опытные образцы селективного планарного элемента были изготовлены на базе градиентных волноводных структур, созданных двухстадийной ионообменной диффузией в подложках из промышленного оптического стекла К8. На первой стадии ионным обменом в расплаве KNO_3 при температуре 400 °С в течение разного времени процесса в серии образцов формировались многомодовые КВ. На второй стадии обработкой в расплавах серебросодержащей смеси нитратов с концентрациями AgNO_3 в пределах 0,15–0,5 мас% при температуре 335 °С в образцах создавались планарные участки структуры элемента связи. Поскольку исследуемый элемент проявляет свойство обратимости работы, достаточно провести требуемые исследования элемента в режиме детектирования

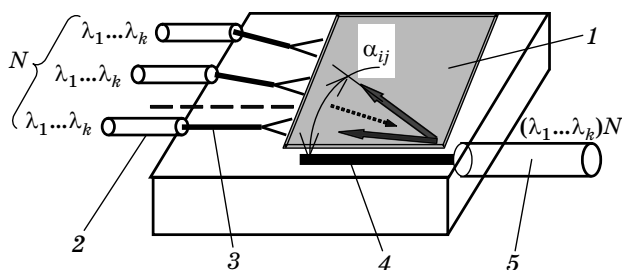


Рис. 2. Принципиальная схема планарного устройства селективного возбуждения/детектирования мод в трехмерном оптическом волноводе. 1 – одномодовый планарный участок, 2 – одномодовые ОВ, 3 – одномодовые КВ с рупорными переходами, 4 – многомодовый КВ, 5 – многомодовое ОВ.

ния мод многомодового КВ. Эти измерения требуют более простой измерительной схемы, а сделанные выводы будут справедливы и для режима селективного возбуждения мод КВ.

В ходе исследований образцов проводились измерения диаграмм направленности (ДН) планарных световых пучков, соответствующих модам КВ. Так как провести надежное измерение ДН световых пучков внутри волновода нельзя, эти пучки выводились из ПВ прижатой к его поверхности объемной призмой с цилиндрическим основанием, после чего проводились измерения ДН этих выведенных пучков. Поперечные распределения интенсивности световых пучков в плоскости одномодового волновода и распределение вдоль m -линии выведенной из него моды имеют один и тот же общий вид и в угловых координатах пересчитываются друг из друга с использованием формулы $\sin\alpha' = N_m \sin\alpha$. Здесь α и α' – направляющие углы световых лучей в плоскости ПВ и в плоскости вышедшего из объемной призмы светового пучка соответственно.

При измерениях ДН выведенных из ПВ световых пучков на алидаду гониометра устанавливался лавинный фотодиод с точечной фотоплощадкой. При регистрации общего вида исследуемых пучков использовалась линейка фотоприемников, ориентируемая параллельно m -линии моды, выводимой из планарного участка элемента связи. В данной работе представлены результаты измерений характеристик демонстрационного образца, проведенные с использованием излучения длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. Для излучения такой частоты планарная область этого образца представляет собой одномодовый ПВ, в котором измеренный традиционным призмным методом ЭПП ТЕ-моды составил $N_m = 1,5245$. Отметим, что разные селективные элементы рассматриваемого типа, предназначенные для работы в различных спектральных диапазонах, совершенно одинаковы по принципу работы. Поэтому, как показано ниже, при оценке работоспособности элементов, создаваемых для спектрального диапазона ВОЛС, могут быть использованы результаты измерений характеристик демонстрационного образца с их пересчетом для другой длины волны света.

В процессе эксперимента возбуждение многомодового КВ осуществлялось фокусировкой светового пучка на входной торец волновода. Этот торцевой способ ввода света в волновод приводит к одновременному возбуждению

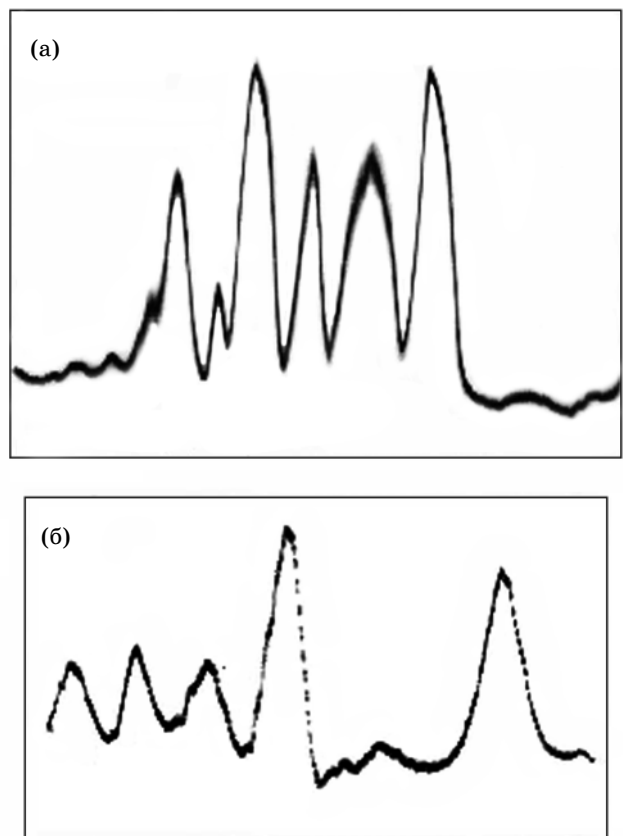


Рис. 3. Примеры осциллограмм сигналов линейки фотоприемников при сканировании сфокусированным световым пучком входного торца КВ.

некоторой группы мод, причем состав этой группы определяется числовой апертурой и наклоном падающего пучка, а также положением сфокусированного светового пятна на торце волновода. На рис. 3 приведены фотографии осциллограмм сигналов линейки фотоприемников при сканировании световым пятном входного торца КВ. Каждый пик соответствует отдельному планарному световому пучку, оптически связанному с конкретной модой многомодового КВ. При сканировании входного торца КВ моды разных порядков возбуждаются в нем в разной степени, что приводит к изменению интенсивности отдельных пиков вплоть до их исчезновения.

Осциллограмма на рис. 3а демонстрирует способность селективного элемента детектировать каналные моды соседних порядков, обеспечивая пространственное разведение соответствующих планарных световых пучков. Рис. 3б подтверждает низкий уровень взаимной связи каналных мод в образце. Отдельно стоящий пик осциллограммы свидетельствует

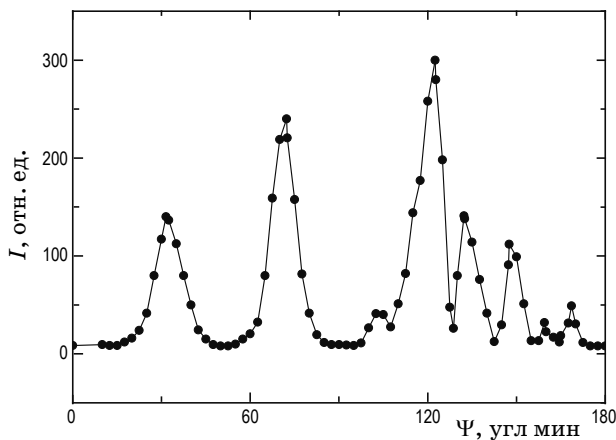


Рис. 4. Общая ДН селективного элемента в режиме детектирования мод многомодового КВ.

о том, что световая мощность, введенная в отдельную канальную моду, сохраняется в ней и не распределяется внутри селективного элемента связи между модами соседних порядков. Эти свойства элемента связи позволяют целенаправленно выбирать и использовать канальные моды заданных порядков для организации требуемого числа модовых информационных каналов.

Результат измерений общей ДН планарного детектора канальных мод, выведенной прижатой призмой из планарной структуры, представлен на рис. 4. Здесь угловая координата Ψ — отсчет по шкале гониометра при произвольно выбранном начале отсчета. Видно, что все пики ДН, соответствующие разным планарным пучкам, полностью разделены по углу. Путем специального выбора параметров планарного и канального волноводов можно увеличить угловое расстояние между соседними планарными пучками. Из формулы (1) следует, что для этого требуется обеспечить условия сближения значения ЭПП планарной моды с ЭПП канальной моды низшего порядка. Покажем это, рассмотрев две канальные моды соседних порядков с ЭПП N_k и N_l , где k и l — обобщенные обозначения порядков мод, причем $l = k + 1$. Обозначим $\delta N = N_k - N_l$ и $\delta\alpha = \alpha_l - \alpha_k$, где α_k и α_l — направляющие углы связанных с этими модами планарных пучков. Заметим, что при таком обозначении $\delta N > 0$ и $\delta\alpha > 0$. Тогда, выразив углы α_k и α_l из условия (1), можем записать

$$\delta\alpha = \arccos(N_l/N_m) - \arccos(N_k/N_m). \quad (2)$$

Рассмотрим влияние выбора параметров планарного участка элемента. Анализ равен-

ства (2) показывает, что зависимость $\delta\alpha(N_m)$ является монотонно убывающей функцией. Следовательно для увеличения углового расстояния $\delta\alpha$ между планарными пучками следует уменьшать ЭПП планарной моды N_m . Однако есть нижний предел подобного уменьшения, задаваемый принципом работы планарного квазипризменного элемента связи: ЭПП планарной моды не может быть меньше ЭПП канальной моды низшего порядка N_{k0} . Тогда, устремив $N_m \rightarrow N_{k0}$ и определив предел величины $\delta\alpha$ из выражения (2), можем оценить максимальное угловое расстояние между планарными пучками, соответствующими двум соседним канальным модам низших порядков, как $\delta\alpha_{\max} = \arccos(1 - \delta N/N_{k0})$. Отсюда также следует вполне очевидный вывод об увеличении значения $\delta\alpha$ при увеличении разности δN между ЭПП соседних канальных мод, что можно достичь выбором параметров КВ. Кроме того, заметим, что формула (2) позволяет оценить угловое расстояние между любыми парами планарных пучков при использовании заданного набора канальных мод, что важно при разработке общей топологии всего устройства.

В результате проведенных измерений оказалось, что форма пиков ДН, демонстрируемых образцами, имеющими приведенную на рис. 2 структуру с постоянной шириной зазора между многомодовым КВ и планарным участком элемента, несимметрична. Это объясняется тем, что в продольных интегрально-оптических устройствах связи, к которым принадлежит исследуемый планарный элемент, вывод света из волновода происходит неравномерно по ходу моды внутри элемента, с максимумом вывода излучения во входной части устройства и дальнейшим спадом интенсивности вывода света из волновода [12]. Подобное поперечное распределение световой мощности в пучке позволяет обеспечить полный вывод света из многомодового КВ в планарную структуру, однако, дальше эти планарные пучки должны быть согласованы с оконечными рупорными переходами одномодовых КВ (см. рис. 2). Поскольку эффективность согласования определяется интегралом перекрытия поперечных распределений полей световых пучков в согласуемых структурах, то для достижения максимальной эффективности оптического согласования формы этих распределений должны быть одинаковыми. Рупорный переход при его возбуждении со стороны узкого торца увеличивает

ширину моды одномодового КВ и имеет на своем широком торце симметричное поперечное распределение поля светового пучка. Поэтому требуется обеспечить такое же распределение для планарного пучка на выходе квазипризменного элемента связи. Способ решения этой задачи – тот же, что применяется в объемных элементах ввода/вывода света из волновода, а именно – использование переменного зазора между призмой и волноводом, причем наибольшую ширину зазор имеет на входе моды в область элемента связи призменного типа. В нашем случае планарного квазипризменного элемента, была изготовлена серия образцов, имеющих линейно изменяющийся зазор с углом клиновидности до $10'$. На рис. 5 представлены ДН отдельных планарных пучков, соответствующих одноименным модам структур с разными углами зазоров. Лучшие результаты с точки зрения оптимального сочетания факторов степени вывода моды канального волновода в виде высоконаправленного планарного светового пучка и симметрии поперечного распределения поля этого пучка были получены для зазоров с углом клиновидности около $5'$. Именно для таких образцов и представлены как осциллограммы на рис. 3, так и результаты измерений ДН световых пучков на рис. 4 и 6.

На рис. 6 продемонстрированы измеренные ДН выведенных из волновода отдельных планарных пучков, возбужденных канальными модами низких порядков, а также результат пересчета этих ДН внутри волноводной структуры. Угловая ширина ДН растет с понижением порядка канальных мод, низшей моде соответствует наиболее широкая диаграмма. Видно, что ее полная расходимость в ПВ не превышает $10'$. Эта величина максимальной расходимости пучков была типичной для образцов с подобными углами зазоров между канальной и планарными структурами элемента.

Определяя работоспособность селективного элемента в некотором спектральном диапазоне, следует выяснить, как повлияет на ДН отдельных планарных пучков и общую диаграмму элемента одновременное использование излучения с разными длинами волн.

Влияние ширины спектрального диапазона

Рассмотрим зависимость изменения направления хода световых пучков в ПВ $\Delta\alpha$ от изменения рабочей длины волны излучения $\Delta\lambda$.

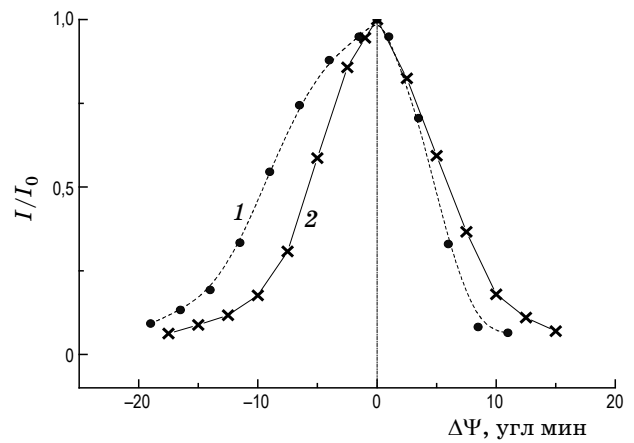


Рис. 5. ДН планарных световых пучков, возбужденных одноименными канальными модами в разных образцах при постоянной (1) и переменной (2) ширине зазора в структуре селективного элемента.

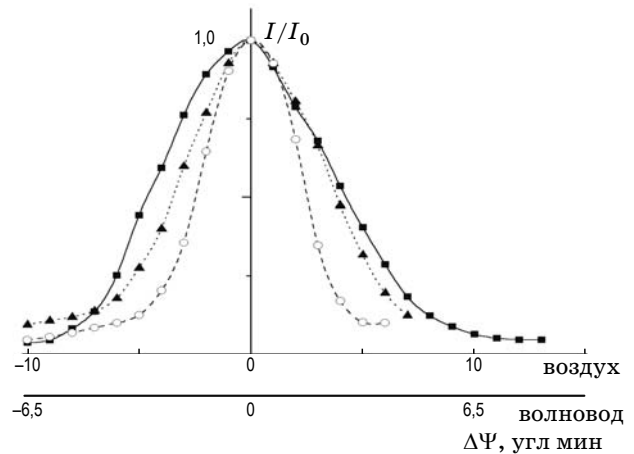


Рис. 6. ДН планарных световых пучков, оптически связанных с канальными модами низших порядков.

Из условия фазового согласования канальных и планарной мод (1) получаем

$$\Delta\alpha = \Delta\lambda \left[N_{ij} \left(\frac{\partial N_m}{\partial \lambda} \right) - N_m \left(\frac{\partial N_{ij}}{\partial \lambda} \right) \right] / \left(N_m^2 \sin \alpha \right). \quad (3)$$

Здесь имеет смысл сделать некоторые допущения. Как и во многих практических случаях, у нас нет сведений о дисперсии показателя преломления (ПП) в ионообменных градиентных слоях анализируемых образцов. Поэтому решение дисперсионных уравнений волноводного распространения света для набора длин

волн излучения может дать для наших структур только приближенные результаты. Следовательно, мы проводим ориентировочную оценку зависимости (3). При этом имеется возможность упростить решение нашей задачи, полагая $(\partial N_m / \partial \lambda) \approx (\partial N_{ij} / \partial \lambda)$. Это допущение вполне можно применить, поскольку преобладающая материальная компонента дисперсии примерно одинакова для канального и планарного волноводов в силу малости изменения состава материала подложки в обеих градиентных структурах при использованных технологиях их изготовления. Тогда выражение (3) принимает следующий вид:

$$\Delta \alpha \approx -\Delta \lambda \sin \alpha (\partial N_m / \partial \lambda) / (N_{ij} + N_m).$$

Учитывая относительно малую величину приращения ПП в профилях исследуемых канального и планарного волноводов, можно использовать приближение $N_{ij} + N_m \approx 2N_m$. При этом формула (3) приходит к виду

$$\Delta \alpha \approx -\Delta \lambda (\partial N_m / \partial \lambda) \sqrt{1 - (N_{ij}^2 / N_m^2)} / (2N_m). \quad (4)$$

Полученное выражение (4) показывает влияние порядка канальной моды на отклонение соответствующего планарного пучка. Видно, что величина $|\Delta \alpha|$ минимальна при наиболее близких значениях N_m и N_{ij} . Следовательно, наименее чувствительны к длине волны света планарные пучки, связанные с канальными модами низших порядков. На использование именно таких мод и следует ориентироваться при применении модового уплотнения в ВОЛС.

Приведем численную оценку с использованием результатов измерений волноводных характеристик одного из образцов, способного работать в спектральной области оптической связи. При изготовлении планарной области элемента связи этого образца использовался расплав, содержащий 0,3 мас% AgNO_3 . Для такого состава расплава максимальное приращение ПП при ионообменной диффузии в стекле К8, по данным работы [13], составляет 0,0136. Измерения на длине волны 632,8 нм показали, что в этой области ПВ поддерживает 2 ТЕ-моды с ЭПП, равными 1,52295 и 1,51582. Распределение ПП по глубине градиентного слоя в волноводах данного типа хорошо описывается гладкой сшивкой параболической и экспоненциальной функций [14]. В работе [15] приведен аналитический вид фазового интеграла дисперсионного уравнения ПВ для такого профи-

ля ПП. Используя измеренные значения ЭПП мод, из решения обратной задачи метода Венцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ) в нулевом приближении (например, [16]) определяем эффективную толщину градиентного слоя $a \approx 3,7$ мкм. Затем решением прямой задачи ВКБ проводился расчет характеристик ПВ для так называемого Основного спектрального диапазона “О” волоконно-оптической связи 1260–1360 нм. Заметим, что параметр a профиля ПП анализируемого волновода остается неизменным при описании этого профиля для любой длины волны излучения, поскольку этот параметр определяется диффузионными свойствами материала подложки и технологическими режимами процесса ионного обмена. Расчет показал, что в спектральном диапазоне “О” планарная часть элемента является одномодовым волноводом с ЭПП ТЕ-моды $N_m = 1,50668$ для $\lambda = 1,3$ мкм. После этого была рассчитана дисперсия этого ПВ $(\partial N_m / \partial \lambda)$.

В случае одномодового волновода, его общая дисперсия включает в себя дисперсию материала и волноводную дисперсию. При определении этих составляющих дисперсии обычно используют некоторые допущения. Волноводная дисперсия рассчитывается из уравнения волноводного распространения света в предположении независимости ПП от длины волны излучения, а при рассмотрении материальной составляющей дисперсии постоянную распространения моды полагают пропорциональной ПП в области волновода, причем распределение ПП в этом слое предполагается однородным [17]. Ввиду малости изменения состава стекла в ионообменном слое, дисперсия материала в области градиентного слоя принималась равной дисперсии подложки. Согласно данным [18] для стекла К8 в диапазоне длин волн 1,1–1,5 мкм дисперсия хорошо описывается линейной зависимостью со средним угловым коэффициентом $-0,0123$ мкм⁻¹. Волноводная дисперсия рассчитывалась решением прямой задачи ВКБ при переменной длине волны излучения. Оказалось, что, как и в большинстве интегрально-оптических структур, в нашем случае преобладает материальная составляющая дисперсии: волноводная дисперсия в пределах спектрального диапазона “О” продемонстрировала практически линейную зависимость с угловым коэффициентом $-0,0059$ мкм⁻¹. Таким образом, общая дисперсия рассматриваемого ПВ в этом спектральном диапазоне составляет $-0,0182$ мкм⁻¹. Заметим, что это же значение

получаем, не рассматривая компоненты дисперсии по отдельности, а просто решая дисперсионное уравнение волноводного распространения света для разных точек спектрального диапазона, учитывая изменение как длины волны излучения, так и ПП материала для каждой точки.

Для оценки величины $\Delta\alpha$ по формуле (4) надо знать соотношение ЭПП планарной и канальных мод. Расчет ЭПП канальных мод проводился методом эффективных показателей преломления, описанным для случая канальных градиентных структур, например в работах [19, 20]. При проведении ионного обмена вида $K_{\text{расплав}}^+ \leftrightarrow Na_{\text{стекло}}^+$ через узкое окно защитной маски распределение ПП, формируемого КВ, в подложке из стекла типа К8 может быть представлено зависимостью вида [21]

$$n(x, y) = n_s + \Delta n_0 \exp(-x^2/d_x^2) \operatorname{erfc}(y/d_y), \quad (5)$$

где $\Delta n_0 = n(0, 0) - n_s$, n_s – ПП подложки, x и y – координаты в поперечном сечении волновода вдоль поверхности и в глубину подложки соответственно, причем $y \geq 0$. Согласно данным работы [21], при изготовлении КВ методом ионного обмена в стекле ВК7 (сходном по основным свойствам со стеклом К8) в силу влияния разных факторов параметры поперечного распределения ПП вдоль d_x и в глубину d_y подложки несколько отличаются. Однако при использованных нами временах диффузии (7–12 ч) и ширине окон защитных масок отличие этих параметров друг от друга в стекле ВК7 невелико и составляет, по данным работы [21], около (10–15)%, не превышая 20%. Поскольку проводимое нами определение отклонения планарных световых пучков $\Delta\alpha$ носит оценочный характер, в наших расчетах параметры d_x и d_y сформированного в стекле К8 профиля ПП многомодового КВ считались приблизительно равными. Значения максимального приращения ПП Δn_0 и параметра d_y определялись в результате анализа характеристик контрольной планарной области К8:К⁺, изготовленной рядом с КВ в едином технологическом цикле. Известно, что профиль ПП в таком ПВ хорошо описывается дополнительной функцией ошибок erfc [22]. Как видно из формулы (5), эта же функция описывает распределение ПП по глубине подложки в плоскости, проведенной через ось КВ нормально к его поверхности. Это дает возможность определить параметры Δn_0 и d из анализа контрольного ПВ, а затем использовать их в расчетах

КВ. Контрольный ПВ продемонстрировал на длине волны 0,633 мкм ТЕ-моды с ЭПП 1,51941, 1,51715 и 1,51579. Решением обратной задачи метода ВКБ получаем $\Delta n_0 = 0,0076$ и параметр $d \approx 10,1$ мкм. В соответствии с рекомендациями работы [14], профиль ПП при расчете этого ПВ был аппроксимирован гладкой спивкой линейной и экспоненциальной функций. Для такой аппроксимации в работе [15] приведено аналитическое выражение фазового интеграла. Полученные в результате расчета значения параметров контрольного ПВ используем при расчетах характеристик КВ. Проведя расчет методом эффективных показателей преломления, получили, что в области Основного спектрального диапазона анализируемый КВ поддерживает 4 моды, высшая из которых – вблизи отсечки.

Теперь можем оценить изменение направления светового пучка $\Delta\alpha$ в ПВ элемента связи в зависимости от рабочей длины волны излучения. При этой оценке используем две моды КВ: низшую моду с ЭПП, равным 1,50566, и третью моду с ЭПП 1,50350 при $\lambda = 1,3$ мкм. Подставив эти значения в формулу (4) вместе с найденным значением общей дисперсии планарного участка элемента, получаем, что для всего спектрального диапазона “О” отклонение направления планарного пучка, соответствующего низшей канальной моде, составит $\Delta\alpha \approx 0,08'$, а для планарного пучка, связанного с третьей канальной модой, $\Delta\alpha \approx 0,14'$. Эти данные подтверждают вывод о том, что планарные пучки, оптически связанные с канальными модами низших порядков, менее чувствительны к изменению длины волны излучения. В любом случае, полученные значения отклонения направления планарных пучков малы и, как видно из представленных на рис. 6 результатов измерений, составляют не более единиц процентов даже от ширины любой из измеренных при $\lambda = 0,6328$ мкм ДН отдельных пучков, а в диапазоне “О” эти ДН существенно шире. Ширину ДН планарных пучков в спектральном диапазоне “О” определяем, используя то, что принцип работы рассматриваемых селективных элементов, рассчитанных на разные рабочие длины волн излучения, один и тот же – утечка канальной моды в планарную область элемента с образованием высоконаправленного планарного светового пучка. Угловая ширина ДН этого пучка определяется его дифракционной расходимостью при излучении из канального волновода в планарный

на протяжении участка их оптической связи, задаваемого топологией элемента и технологией его изготовления. При заданной длине связи главным фактором, влияющим на соотношение расходимостей одиночных планарных пучков в элементах, предназначенных для разных спектральных диапазонов, является отношение рабочих длин волн излучения. Поэтому для оценки работы селективного элемента в спектральном диапазоне “О” используем результаты измерений ДН демонстрационного образца, проводя перерасчет угловой ширины измеренных ДН для другой длины волны света. В результате этих действий получаем, что с учетом дифракционного уширения пучков на длине волны 1,3 мкм, а также их уширения за счет отклонения направления осей пучков при применении излучения в пределах Основного спектрального диапазона, результирующая ширина ДН в ПВ составит не более 22' для пучка, возбужденного низшей канальной модой, менее 20' для второго планарного пучка и не более 16' для пучка, связанного с третьей канальной модой при одновременном использовании всего спектрального диапазона “О”. Проведенный с использованием формулы (2) расчет углового расстояния между осями планарных световых пучков, связанных с тремя анализируемыми канальными модами, показывает, что при $\lambda = 1,3$ мкм угол между планарными пучками, связанными с двумя соседними низшими канальными модами, составит приблизительно 64', а угол между вторым и третьим планарными пучками – примерно 33'. Сравнение этих значений с результатами оценки ширины ДН пучков приводит к выводу о том, что планарные пучки, связанные с канальными модами низких порядков, будут разделены по направлению распространения, причем даже лучше, чем пучки на диаграмме для демонстрационного образца на

* * * * *

рис. 4. В то же время малое отклонение осей пучков в пределах всего спектрального диапазона “О” позволяет каждому планарному пучку, возбужденному соответствующей спектрально-уплотненной модой многомодового КВ, полностью попадать в рупорный переход своего выходного одномодового КВ селективного устройства.

Все это говорит о работоспособности представленного элемента селективного возбуждения мод в пределах всего рассматриваемого Основного диапазона “О” спектрального уплотнения данных.

Заключение

Представленные результаты экспериментального исследования ключевого рабочего элемента интегрально-оптического устройства селективного возбуждения трехмерного оптического волновода свидетельствуют о работоспособности такого элемента в пределах, по крайней мере, Основного диапазона “О” спектрального уплотнения. Это обстоятельство подтверждает возможность применения трехступенчатой каскадной схемы уплотнения данных в многомодовых ВОЛС и локальных сетях при использовании метода модового уплотнения в комбинации с известными методами временного и спектрального уплотнений. На первой ступени подобной схемы должен использоваться метод временного уплотнения, на второй – спектральный метод, на третьей – модовое уплотнение. Применение этой схемы уплотнения данных позволит многократно увеличить информационную емкость многомодовых линий связи. Такая каскадная схема может использоваться как при построении новых ВОЛС и локальных сетей, так и для реконструкции созданных в последнее десятилетие многомодовых волоконных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tur M., Menashe D., Japha Y., Danziger Y. High-order mode based dispersion compensating modules using spatial mode conversion // J. Optical and Fiber Communications Reports. 2007. V. 4. P. 110–172.
2. Duser M., Bayvel P. 2.5 Gbit/s transmission over 4.5 km of 62.5 mcm multimode fibre using centre launch technique // Electron. Lett. 2000. V. 36. P. 57–58.
3. Asawa C.K. Intrusion-alarmed fiber optic communication link using a planar waveguide bimodal launcher // J. Lightwave Technol. 2002. V. 20. № 1. P. 10–18.
4. Yam S.S.-H., Achten F. Single wavelength 40 Gbit/s transmission over 3.4 km broad wavelength window multimode fibre // Electron. Lett. 2006. V. 42. P. 592–593.

5. *Kawaguchi Y., Tsutsumi K.* Mode multiplexing and demultiplexing devices using multimode interference couplers // *Electron. Lett.* 2002. V. 38. № 25. P. 1701–1702.
 6. *Lee B.-T., Shin S.-Y.* Mode-order converter in a multimode waveguide // *Optics Lett.* 2003. V. 28. № 18. P. 1660–1662.
 7. *Свистунов Д.В.* Применение планарной призмы для детектирования и селективного возбуждения мод многомодового канального волновода // *Письма в ЖТФ.* 2004. Т. 30. В. 8. С. 62–67.
 8. *Svistunov D.V.* Selective mode launching in a multimode channel waveguide by planar coupler // *J. Optics A: Pure and Appl. Opt.* 2004. V. 6. № 8. P. 859–861.
 9. *Karpeev S.V., Pavelyev V.S., Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Gavrilov A.V., Erolov V.A.* Fibre sensors based on transverse mode selection // *J. Modern Optics.* 2007. V. 54. № 6. P. 833–844.
 10. *Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В.* Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.
 11. *Nykolak G., Wilder G., Eskildsen L., Patel N., Strasser T., Tsuda M., Kobayashi H., Carter D.* Elimination of self-contamination in high-density low-loss single-mode fiber array connectors // *J. Lightwave Technol.* 2004. V. 22. № 1. P. 24–28.
 12. *Интегральная оптика / Под ред. Тамира Т. М.: Мир, 1978. 344 с.*
 13. *Подвзный А.А., Свистунов Д.В.* О формировании ионообменных волноводов в стеклах при использовании серебродержащих расплавов // *Письма в ЖТФ.* 2003. Т. 29. В. 11. С. 35–40.
 14. *Золотов Е.М., Киселев В.А., Пелехатый В.М.* Определение характеристик оптических диффузных волноводов // *Квант. электрон.* 1978. Т. 5. № 11. С. 2376–2382.
 15. *Svistunov D.V.* Determination of profile parameters of planar waveguides // *Proc. SPIE.* 1995. V. 2648. P. 215–220.
 16. *Адамс М.* Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
 17. *Снайдер А., Лав Дж.* Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
 18. *ГОСТ 13659-78.* Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 27 с.
 19. *Волноводная оптоэлектроника / Под ред. Тамира Т. М.: Мир, 1991. 575 с.*
 20. *Rodriguez J., Fernandez S., Palacios S.L., Crespo R.D., Fernandez J.M., Guinea A., Virgos J.M., Olivares J.* Equivalent-optical-waveguide model for the analysis of optical waveguides by means of an asymptotic effective-index method // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. № 27. P. 6172–6179.
 21. *Weiss M.N., Srivastava R.* Determination of ion-exchanged channel waveguide profile parameters by mode-index measurements // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. № 3. P. 455–458.
 22. *Галечян М.Г., Лындин Н.М., Нурлигареев Д.Х., Тищенко А.В.* Анизотропия волноводов, полученных электро-диффузией ионов Cs и K из расплавов CsNO₃ и KNO₃ в стекло // *ЖТФ.* 1990. Т. 60. В. 9. С. 133–136.
-