

Спектры пропускания структуры на основе отрезка волокна с двойной оболочкой при изгибе

И.В.Злодеев, О.В.Иванов

Исследована волоконно-оптическая структура, принцип действия которой основан на преобразовании мод сердцевины и оболочки, связь между которыми происходит на стыке двух волокон, имеющих различные профили показателя преломления. Структура состоит из отрезка одномодового волокна SM630 с тонкой сердцевиной и двойной оболочкой, вставленного между двумя стандартными волокнами SMF-28. Измерены спектры пропускания предложенной структуры при изгибе отрезка волокна SM630. Проанализированы модовая структура волокна с двойной оболочкой и причины возникновения провалов в спектре пропускания. Обнаружено смещение резонансов в длинноволновую область при увеличении кривизны волокна. Исследована зависимость смещения от длины волокна-вставки, ориентации его изгиба и типа подводящего волокна.

Ключевые слова: оптическое волокно, оболочечные моды, оптоволоконный датчик изгиба.

1. Введение

Волоконные структуры, принцип действия которых основан на взаимодействии и преобразовании оболочечных мод, представляют значительный интерес в связи с простотой их изготовления и возможностью использования в различных волоконно-оптических устройствах, например в датчиках или фильтрах [1]. К таким структурам относятся длиннопериодные решетки, связывающие однонаправленные моды; брэгговские решетки, возбуждающие встречнонаправленные моды; интерферометры, основанные на интерференции основной моды сердцевины с одной или несколькими модами оболочки [2, 3], и ряд других. Перечисленные волоконные структуры могут найти применение в качестве датчиков различных физических параметров, в частности натяжения [4, 5], температуры [6], давления, изгиба [7], показателя преломления внешней среды [8].

Для возбуждения моды оболочки посредством передачи энергии из основной моды в волокне должен быть создан некоторый дефект: длиннопериодная решетка [9], стык двух волокон с несогласованными профилями мод сердцевины [3, 10], стык стандартного волокна и микроструктурированного [11], в котором также могут распространяться моды высших порядков [12], схлопывание отверстий дырчатого волокна [13] и т. п. Комбинация двух таких дефектов при наличии отрезка волокна между ними образует интерферометр, пропускание которого будет определяться модовой структурой и постоянными

распространения мод сердцевины и оболочки вставленного отрезка.

Ранее нами была предложена структура, состоящая из отрезка волокна SM630 с тонкой сердцевиной и двойной оболочкой, заключенного между стандартными волокнами SMF-28 [10]. Отрезок волокна-вставки имеет сердцевину, диаметр которой меньше диаметра стандартного волокна, и является одномодовым на длинах волн, превышающих 612 нм. В спектрах пропускания предложенной структуры экспериментально обнаружены интерференционные пики, наличие которых было обосновано теоретически [14], а также широкие провалы, причина появления которых до настоящего времени была не выяснена.

В настоящей работе анализируются модовая структура волокна с двойной оболочкой и причины возникновения провалов в спектре пропускания, приводятся результаты экспериментального исследования спектров новой волоконно-оптической структуры при изгибе отрезка волокна с двойной оболочкой. Анализируются зависимости спектров пропускания структуры от длины отрезка волокна SM630 и от типа (длины волны отсечки) волокна, подводящего излучение к волокну-вставке. Приводятся результаты измерения спектров, выявляющие влияние направления изгиба волокна на спектральные характеристики.

2. Волоконная структура

Исследуемая в работе волоконно-оптическая структура состоит из отрезка волокна SM630 (3M Specialty Optical Fibre), вставленного между двумя отрезками стандартного волокна SMF-28 ($r_{co} = 4.2$ мкм, $\Delta = 0.36\%$, $NA = 0.14$, $\lambda_{cutoff} = 1260$ нм). Для соединения оптических волокон используется обычный автоматический сварочный аппарат.

Схема экспериментальной установки для измерения спектра пропускания структуры приведена на рис. 1. Свет широкополосного источника запускается в стандартное волокно, проходит через исследуемую структуру, которая может изгибаться вдоль линии заданного радиуса кривизны.

И.В.Злодеев. Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42; e-mail: stygwaar@yandex.ru
О.В.Иванов. Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, 432011 Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2; Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42; e-mail: olegivvit@yandex.ru

Поступила в редакцию 11 сентября 2012 г., после доработки – 2 ноября 2012 г.

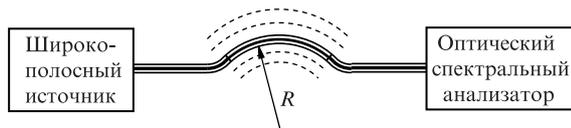


Рис.1. Волоконно-оптическая схема, используемая в эксперименте.

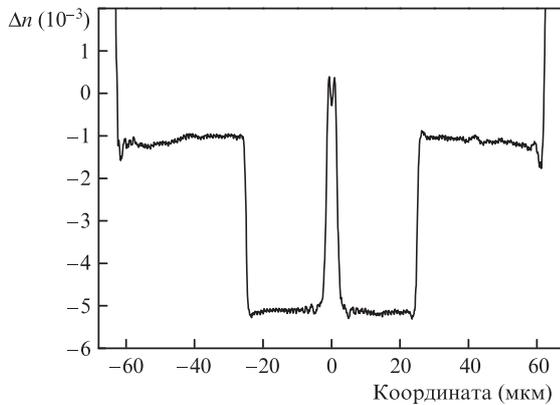


Рис.2. Профиль показателя преломления волокна SM630.

визны, и выводится в спектральный анализатор. Длина отрезка волокна SM630 составляет, как правило, от 5 до 30 см, но может увеличиваться до нескольких метров или уменьшаться до нескольких миллиметров.

Используемое в качестве вставки волокно SM630, как показали измерения его профиля показателя преломления (рис.2), имеет внутреннюю оболочку с показателем преломления n_{inn} , меньшим показателя преломления внешней оболочки n_{cl} ($n_{cl} - n_{inn} = 0.0043$). Радиус внутренней оболочки составляет 25 мкм. Диаметр сердцевины волокна более чем вдвое меньше, чем у стандартного волокна: $r_{co} = 1.8$ мкм. Разность показателей преломления сердцевины (n_{co}) и внутренней оболочки (n_{inn}) составляет 0.0054. Малый радиус сердцевины волокна SM630 обусловлен тем, что рабочая длина волны этого волокна равна 630 нм ($\lambda_{cutoff} = 612$ нм). В настоящей работе структура на основе отрезка волокна SM630 исследуется в диапазоне длин волн 1100–1700 нм, в котором сердцевина указанного радиуса удерживает моды достаточно слабо.

На первом стыке волокон SMF-28 и SM630, имеющих различные параметры сердцевины, мощность из моды сердцевины волокна SMF-28 распределяется между модами второго волокна, поскольку профили мод двух волокон различны. От первого стыка моды распространяются по отрезку волокна SM630 ко второму стыку. Часть энергии рассеивается в результате частичной передачи ее модам высоких порядков и потерь на поверхности волокна. На втором стыке моды волокна SM630 преобразуются в моду сердцевины волокна SMF-28 и могут интерферировать друг с другом. Также на втором стыке часть излучения попадает в оболочку волокна SMF-28, где теряется,

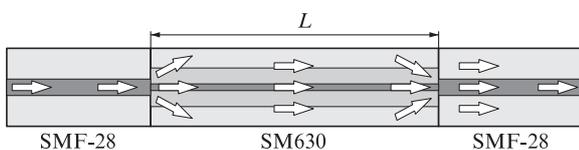


Рис.3. Схема распространения световых лучей в волоконной структуре.

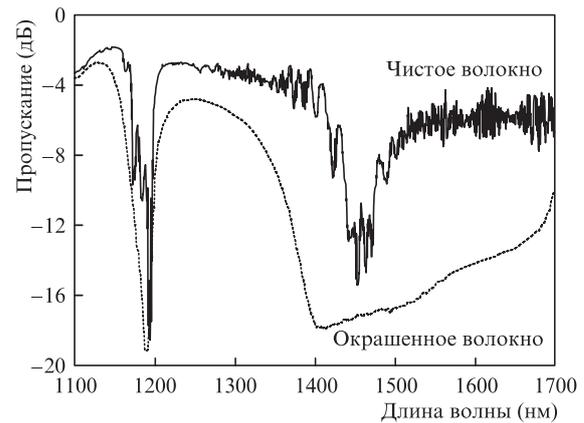


Рис.4. Спектры структуры с защищенным от полимерного покрытия волокном и с окрашенным волокном.

не возвращаясь в его сердцевину. Ход световых лучей в созданной структуре показан на рис.3.

Волоконная структура, включающая защищенный от полимерного покрытия отрезок волокна SM630 и прилегающие участки стандартного волокна, была зафиксирована изначально вдоль прямой линии. Длина отрезка волокна SM630 составляла 22.5 см. Спектр пропускания описанной структуры (рис.4, сплошная кривая) содержит нерегулярные осцилляции, средний период которых по длине волны, как было показано ранее [10], обратно пропорционален длине интерферометра. Эти осцилляции обусловлены интерференцией моды сердцевины и мод оболочки. При этом огибающая спектра имеет два широких провала: один (шириной около 30 нм) расположен на длине волны 1185 нм, а другой (шириной около 50 нм) — на длине волны 1450 нм. Положение и ширины провалов не зависят от длины волокна-вставки, что указывает на их неинтерференционное происхождение.

Далее в настоящей работе нас будет интересовать поведение только указанных широких провалов в спектре, поэтому, чтобы удалить множественные интерференционные пики, образованные взаимодействием с оболочечными модами высоких порядков, мы окрасили оболочку отрезка волокна черной краской. В результате окрашивания спектр пропускания структуры становится более гладким, без многочисленных осцилляций (рис.4, пунктирная кривая). При этом провал на длине волны 1185 нм становится более гладким и четким, а провал на длине волны 1450 нм размывается в широкую полосу поглощения (от 1350 до 1700 нм). Причины такого поведения спектра будут обсуждаться в следующем разделе.

Проведенные нами многочисленные эксперименты по созданию исследуемой структуры с использованием различных сварочных аппаратов показали, что положение главных провалов в спектре пропускания сохраняется на одних и тех же длинах волн и не изменяется от сварки сварке, а следовательно, не связано с ее качеством.

Провал вблизи $\lambda = 1185$ нм имеет довольно четкую форму, поэтому возможно его использование в качестве датчика различных физических воздействий на волокно. Образование провалов в спектре обусловлено возбуждением оболочечных мод волокна. Возбуждение оболочечных мод происходит также в длиннопериодных решетках, которые, как известно, чувствительны к натяжению, температуре, изгибу и другим параметрам вследствие изменения постоянного распространения оболочечных мод [1].

Поэтому можно ожидать, что положение провала исследуемой структуры также будет зависеть от перечисленных параметров и, в частности, от изгиба.

3. Моды волокна SM630

Покажем, каким образом возможно образование провалов в спектрах исследуемой структуры. Волокно SM630 имеет внутреннюю оболочку с пониженным показателем преломления, поэтому его модовая структура существенно отличается от структуры мод стандартного волокна. Мы провели расчет эффективных показателей преломления n_{eff} мод волокна SM630 ($n_{\text{eff}} = \beta/k_0$, где β – постоянная распространения моды и k_0 – волновое число в вакууме), предполагая, что волокно имеет ступенчатый профиль со следующими параметрами: $r_{\text{co}} = 1.8$ мкм, $n_{\text{cl}} - n_{\text{inn}} = 0.0054$, $r_{\text{inn}} = 25$ мкм, $n_{\text{cl}} - n_{\text{inn}} = 0.0043$, $r_{\text{cl}} = 62.5$ мкм (n_{cl} рассчитывается с использованием формулы Селлмейера, описывающей дисперсию кварцевого стекла).

Для расчета оболочечных мод использовался матричный метод, позволяющий находить моды многослойных цилиндрических световодов с произвольным числом слоев. Метод основан на преобразовании уравнений Максвелла к матричной форме для матриц 4×4 , задающих преобразование вектора поля, составленного из тангенциальных границ электрических и магнитных полей [1]. В параксиальном приближении состояние поля задается двухкомпонентным вектором, составленным из тангенциального границ электрического поля и его производной, а его преобразование между слоями показателя преломления в световоде описывается матрицами 2×2 . Параксиальное приближение состоит в том, что распространение мод предполагается почти параллельным оси волокна и что относительная разность эффективных показателей преломления мод и показателя преломления оболочки $(n_{\text{eff}} - n_{\text{cl}})/n_{\text{cl}}$ является малой величиной.

На рис.5 приведены зависимости эффективных показателей преломления для первых восьми азимутально-симметричных мод волокна SM630 от длины волны, рассчитанные в параксиальном приближении. В этом приближении можно считать, что моды имеют линейную поляризацию, и обозначить их LP_{lm} . Пары цифр около линий соответствуют индексам lm , задающим модовые числа линейно поляризованных мод. Первый индекс в

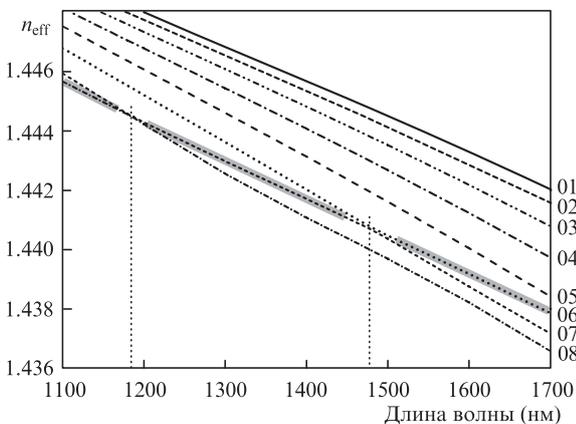


Рис.5. Зависимости эффективных показателей преломления для первых восьми мод волокна SM630 от длины волны. Вертикальными линиями указаны длины волн, на которых происходит максимальное сближение зависимостей для двух мод.

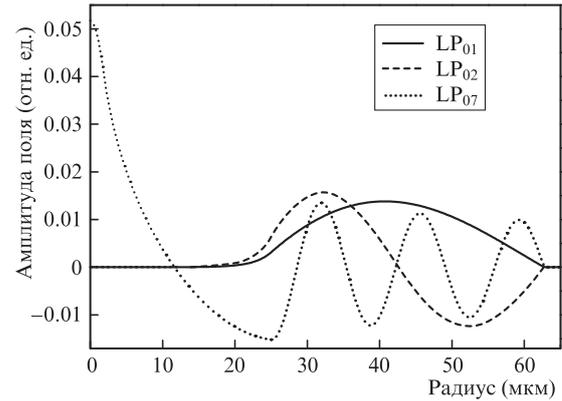


Рис.6. Профили полей некоторых мод световода SM630 на длине волны излучения 1550 нм.

используемом обозначении задает азимутальную структуру моды: l начинается с нуля и равняется числу изменений знака амплитуды поля по азимуту (таким образом, моды LP_{0m} имеют профиль без азимутальной структуры); второй индекс соответствует порядковому номеру моды при расположении мод в порядке уменьшения эффективного показателя преломления для фиксированного значения азимутального числа.

Зависимости для первых пяти мод близки к прямо пропорциональным с отрицательным углом наклона соответствующих прямых к оси длин волн. Эти моды во всем исследуемом диапазоне длин волн являются модами внешней оболочки. Профили распределения полей двух из этих мод (LP_{01} и LP_{02}) показаны на рис.6. Амплитуды этих полей в области сердцевинки близки к нулю, а во внутренней оболочке они отличны от нуля только вблизи границы внутренней и внешней оболочек.

Далее идут моды, которые меняют свой тип с изменением длины волны. Так, мода LP_{06} до длины волны ~ 1480 нм является модой внешней оболочки, а при $\lambda > 1500$ нм становится модой сердцевинки. Профиль поля моды LP_{06} на длине волны 1550 нм показан пунктирной линией на рис.7; видно, что большая часть энергии этой моды сосредоточена в центре волокна. Вместе с тем во внешней оболочке также присутствуют незначительные осцилляции поля моды. На длине волны 1490 нм (рис.5) возникает видимость пересечения зависимостей для двух мод, тогда как в действительности есть только значительное сближение эффективных показателей преломления для

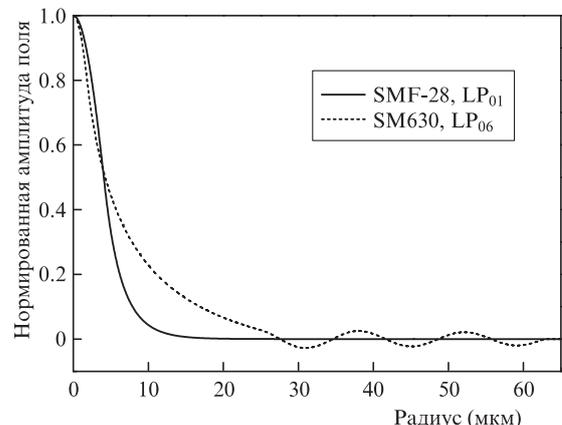


Рис.7. Профили полей мод сердцевинки оптических световодов SMF-28 и SM630 на длине волны излучения 1550 нм.

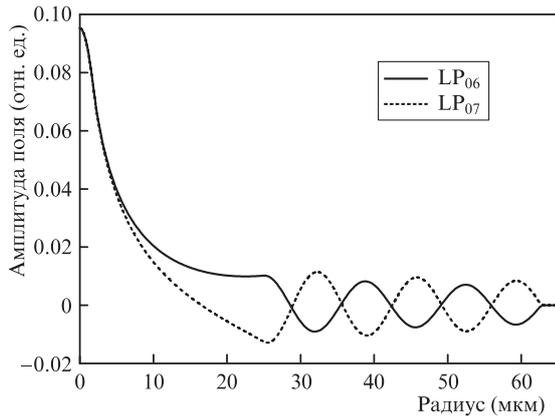


Рис.8. Профили полей мод LP_{06} и LP_{07} световода SM630 на длине волны 1489.4 нм, соответствующей точке сближения постоянных распространения двух мод.

этих двух мод. При этом сближении происходит изменение типа мод: мода сердцевинной LP_{07} становится модой оболочки, а мода LP_{06} – модой сердцевинной. Аналогичная ситуация имеет место на длине волны 1185 нм для мод LP_{07} и LP_{08} . На рис.5 выделены участки зависимостей для мод LP_{06} , LP_{07} и LP_{08} , на которых они являются модами сердцевинной.

Моды, следующие за модой сердцевинной, являются модами всего волокна – их поле распространяется как в его сердцевине, так и во внутренней и внешней оболочках (см. рис.6, кривая для LP_{07}). На длине волны, соответствующей сближению зависимостей для двух мод, эти моды имеют схожие профили: поле присутствует и в сердцевине и в оболочке (см. рис.8).

При создании структуры, включающей отрезок волокна SM630, излучение из сердцевинной волокна SMF-28 попадает на стыке в волокно SM630 с иным набором собственных мод. Энергия излучения перераспределяется между всеми модами волокна SM630. Самая эффективная передача энергии происходит в моду с профилем поля, наиболее близким к профилю поля моды сердцевинной волокна SMF-28. Такой модой является мода сердцевинной волокна SM630, которой в зависимости от длины волны является одна из мод – LP_{06} , LP_{07} или LP_{08} . В то же время можно отметить, что профиль поля моды сердцевинной в волокне SM630 имеет существенно большую протяженность, чем профиль моды в стандартном волокне (см. рис.7), поскольку сердцевина SM630 слабее направляет моду, чем сердцевина SMF-28. Так, на радиусах, превышающих 15 мкм, амплитуда поля моды SM630 более чем на порядок превышает амплитуду поля моды волокна SMF-28.

На тех участках длин волн, где происходит сближение эффективных показателей преломления некоторых двух мод, излучение переходит в обе эти моды, а также в другие моды более высоких порядков (в том числе излучательные), имеющие ненулевые амплитуды поля в области сердцевинной. Поле этих мод на внешней оболочке значительно больше поля моды сердцевинной.

На втором стыке волокон излучение снова попадает в волокно SMF-28. Если в волокне-вставке распространялась в основном одна мода сердцевинной, то она преобразуется обратно в моду сердцевинной и потери будут незначительны. Однако на тех длинах волн, где происходит сближение постоянных распространения, возбуждается много мод высоких порядков, возвращение которых в

сердцевину происходит с большими потерями и сопровождается их интерференцией. Как видно из рис.4, на экспериментальных спектрах пропускания в двух областях сближения постоянных распространения (1185 нм и 1480) наблюдаются соответствующие провалы.

Расчет показывает, что амплитуда поля моды сердцевинной во внешней оболочке, а также на ее внешней границе растет с увеличением длины волны. Поэтому при наличии поглощения на указанной границе потери для моды сердцевинной также будут расти с длиной волны. Этот рост потерь на больших длинах волн мы и наблюдаем, когда окрашиваем волокно.

4. Эксперимент

Структура с изгибом. Для выяснения чувствительности структуры к изгибу были проведены измерения эволюции спектра пропускания при увеличении кривизны волокна. Для получения изгиба структуры с фиксированным радиусом кривизны волокно размещалось вдоль начерченной на плоскости линии (см. рис.1). Измеренные спектры пропускания структуры с отрезком волокна длиной 22.5 см показаны на рис.9. Видно, что в спектре структуры без изгиба присутствует четко выраженный основной провал на длине волны 1185 нм. При увеличении кривизны волокна этот провал смещается в длинноволновую область и его глубина растет. Спектр пропускания в области длин волн, превышающих 1400 нм, остается практически неизменным.

При радиусах кривизны волокна менее 10 см в коротковолновой части спектра появляется новый провал. На рис.9,б показана эволюция спектров пропускания при

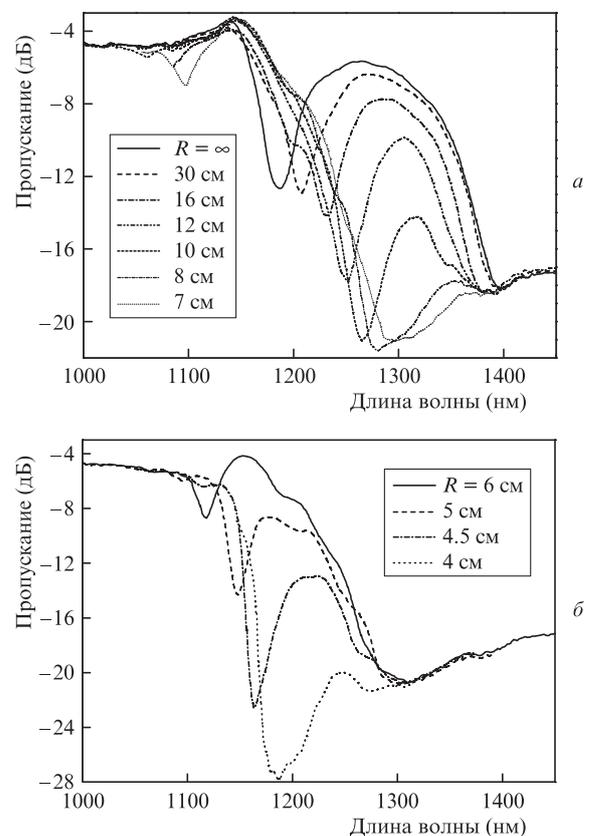


Рис.9. Спектры структуры длиной 22.5 см при изменении радиуса кривизны волокна R от бесконечности до 7 см (а) и от 6 до 4.5 см (б).

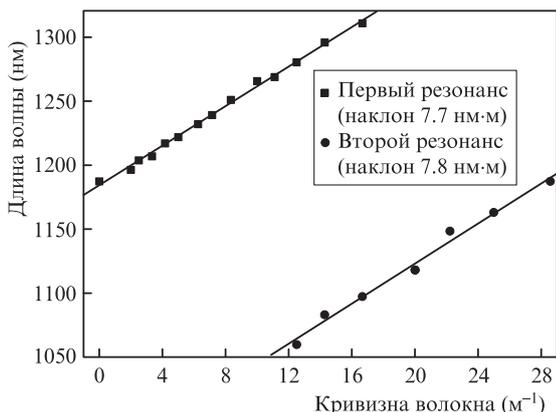


Рис. 10. Изменение двух резонансных длин волн структуры длиной 22.5 см при увеличении радиуса кривизны волокна.

уменьшении радиуса кривизны от 6 до 4.5 см. Амплитуда нового провала растет, и он, как и первый провал, смещается в сторону больших длин волн. Можно предположить, что этот провал обусловлен наличием на длинах волн до 1100 нм области сближения постоянных распространения мод LP_{08} и LP_{09} .

На рис. 10 показаны зависимости длин волн двух провалов в спектре пропускания структуры от кривизны волокна. Эти зависимости близки к линейным, а наклоны соответствующих аппроксимационных кривых практически совпадают.

Для того чтобы выявить зависимость чувствительности исследуемой структуры к изгибу от ее длины, были проведены измерения, аналогичные уже выполненным, с волокном SM630 меньшей длины. Для этого волоконная схема разрывалась в месте сварки, волокно с сердцевинной малого диаметра укорачивалось на несколько сантиметров и снова сваривалось со стандартным волокном.

Спектры структур с меньшими длинами проявляют те же особенности, что и спектры структуры начальной длины. На тех же длинах волн наблюдаются широкие провалы, положение которых не зависит от длины структуры. Амплитуда провалов уменьшается для структур меньшей длины (рис. 11). При малых радиусах кривизны, как и ранее, появляется и увеличивается провал, сдвигающийся в наблюдаемый диапазон коротких длин волн (рис. 11, б). Как показано на рис. 12, сдвиг длины волны в зависимости от кривизны для структуры, которая в 2.4 раза короче начальной, совсем незначительно (на 12%) больше, чем сдвиг в спектре начальной структуры. Таким образом, чувствительность к изгибу слабо зависит от длины волокна-вставки.

Влияние типа подводящего волокна на спектр пропускания. Как мы предположили выше, появление провалов в спектрах пропускания исследуемой структуры связано с наличием области сближения постоянных распространения мод. Положение провалов (по длине волны) определяется модовой структурой волокна-вставки. Это согласуется с экспериментально обнаруженной особенностью провалов, состоящей в независимости их положения от длины структуры. Далее мы попытались проверить, зависит ли положение провалов от типа волокна, подводящего излучение к волокну-вставке. Для этого мы добавили отрезки волокна LEAF (Corning) длиной 1 м перед волокном SM630 и после него. В отличие от стандартного волокна, имеющего отсечку вблизи 1260 нм, волокно LEAF

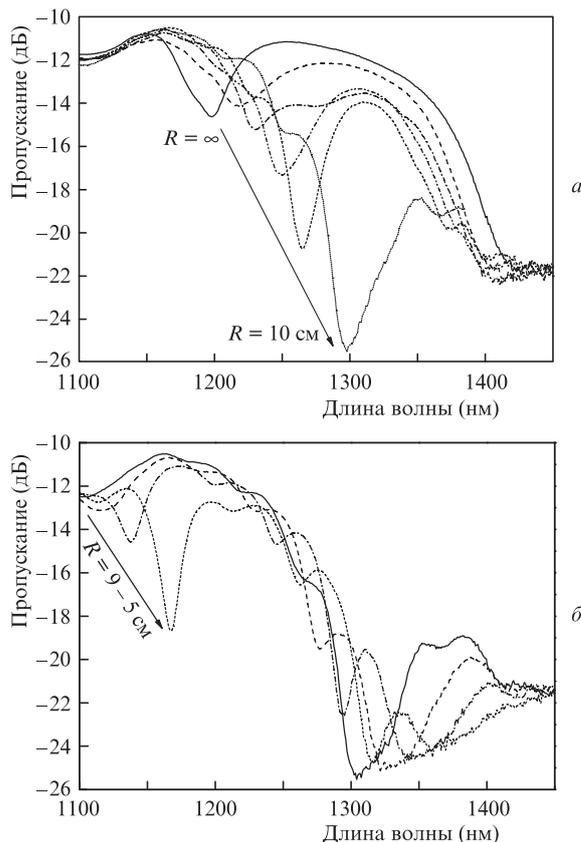


Рис. 11. Спектры пропускания структуры длиной 9.5 см при изменении радиуса кривизны волокна от бесконечности до 10 см (а) и от 9 до 5 см (б).

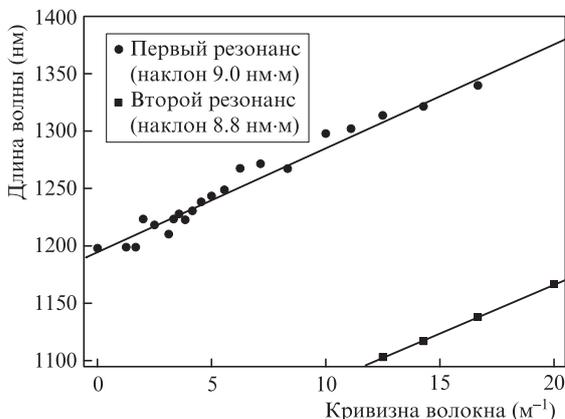


Рис. 12. Изменение двух резонансных длин волн структуры длиной 9.5 см при увеличении радиуса кривизны волокна.

имеет отсечку на длине волны, меньшей 1480 нм, поэтому можно было ожидать иного положения резонансных провалов, чем в структуре на основе SM630. Однако измерение спектров показало, что провалы наблюдаются на тех же длинах волн, что и ранее.

Тем не менее, как видно из рис. 13, а, при замене подводящего и отводящего излучение волокна произошло некоторое изменение формы основного провала и зависимости его амплитуды от кривизны волокна. Спектр прямого волокна в этом случае имеет более глубокий, ровный и симметричный провал, но при увеличении кривизны волокна амплитуда спектра сначала уменьшается, а затем увеличивается, как в структуре с подводимым волокном

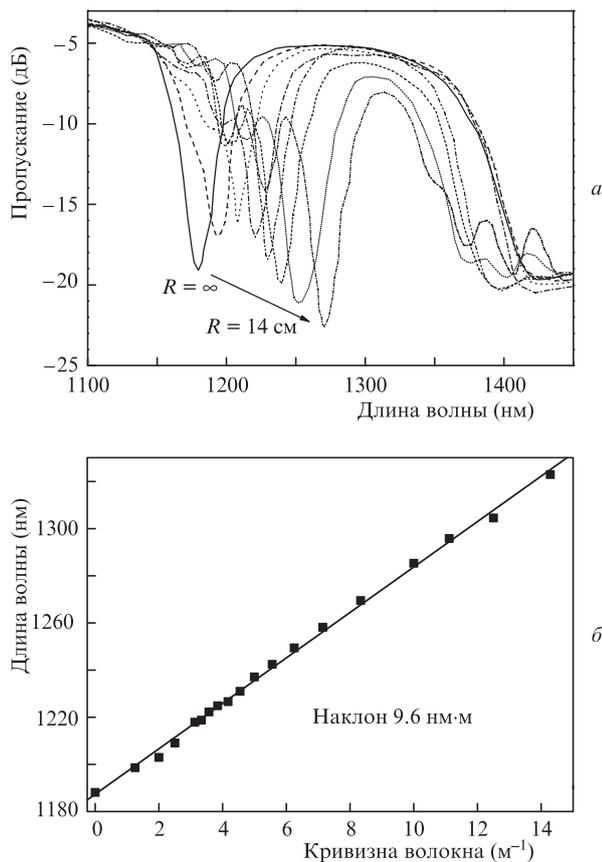


Рис.13. Эволюция спектра пропускания структуры длиной 19,5 см с подводом излучения через волокно LEAF (а) и изменение резонансной длины волн (б) при изменении радиуса кривизны структуры.

SMF-28. Что касается чувствительности положения провала к изменению кривизны, то она несущественно отличается от чувствительности изначальной структуры и составляет 9,6 нм (рис.13,б). Таким образом, длина волны отсечки подводимого волокна влияет на характеристики исследуемой структуры несущественно.

Влияние направления изгиба волокна на его спектр пропускания. Один из возможных механизмов сдвига провалов в спектрах при изгибе волокна – это деформация сжатия или растяжения сердцевинки в случае, когда сердцевина изначально смещена относительно центральной оси волокна. Такое смещение происходит при нецентросимметричности структуры волокна, возникшей вследствие, например, неточности процесса изготовления. В этом случае знак деформации (сжатие или растяжение) определяется направлением изгиба волокна по отношению к направлению смещения сердцевинки, а спектры пропускания должны зависеть от ориентации изгиба волокна. Асимметрия структуры также может возникнуть в случае несимметричной внутренней оболочки или при сварке волокон со смещением относительно друг друга.

Чтобы выявить возможную асимметрию волокна в структуре, мы исследовали зависимость спектра пропускания структуры от направления изгиба. Для этого отрезок волокна с малой сердцевинкой был закреплен на плоскости вдоль дуги окружности радиусом 13 см. При закреплении мы постарались устранить возможное скручивание волокна. Вблизи мест сварки на волокне были закреплены бумажные указатели, позволяющие регистрировать угол поворота волокна. Затем волокно поворачи-

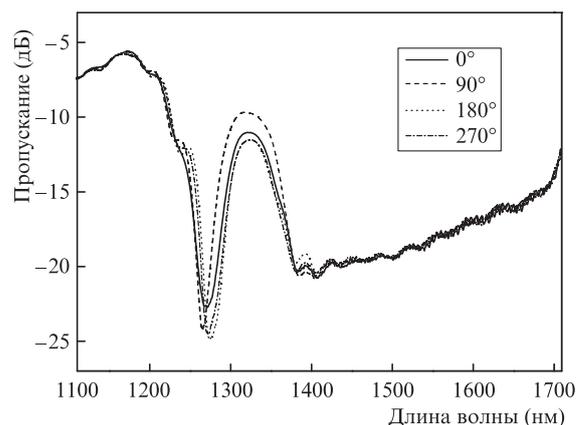


Рис.14. Спектры пропускания структуры длиной 18 см, искривленной вдоль дуги с радиусом кривизны 13 см, в зависимости от направления изгиба волокна.

валось вокруг своей оси с шагом 90° , тем самым изменялось направление изгиба по отношению к ориентации волокна. Полученные для различных углов поворота спектры пропускания структуры представлены на рис. 14. Видно, что они практически не зависят от направления изгиба волокна. Положение провала сохраняется на одной и той же длине волны с постоянным сдвигом около 80 нм по отношению к положению провала в неизогнутом волокне. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что сдвиг провала не связан с асимметрией структуры волокна или мест сварки. Этот сдвиг обусловлен, по-видимому, изменением постоянной распространения оболочечной моды при изгибе волокна [15], при котором происходит неоднородное изменение показателя преломления как в сердцевине, так и в оболочке волокна. Данное изменение связано с фотоупругим эффектом, а также с эффектом, обусловленным изгибом световода и эквивалентным модифицированию профиля показателя преломления прямого световода. Амплитуда этого изменения прямо пропорциональна расстоянию от оси изгиба волокна и поэтому мала в области сердцевинки и максимальна на поверхности волокна, в результате чего наиболее сильному влиянию изгиба подвержены моды оболочки. Изменение профиля показателя преломления волокна приводит к смещению профилей полей оболочечных мод и к изменению их постоянных распространения. В результате сближение постоянных распространения двух мод, которое для прямого волокна происходило на одной длине волны, будет происходить уже на другой длине волны, что выразится в смещении наблюдаемого провала в изогнутом волокне.

5. Заключение

Таким образом, предложен механизм образования провалов в спектрах волоконной структуры, состоящей из отрезка волокна SM630 с двойной оболочкой, вставленного между стандартными волокнами SMF-28. Продемонстрировано, что провалы образуются на длинах волн, соответствующих сближению постоянных распространения двух мод волокна с двойной оболочкой. Измерены спектры пропускания структуры при изгибе волокна. Показано, что с увеличением кривизны отрезка волокна происходит смещение провалов в спектрах в длинноволновую область с одновременным увеличением их амплитуды.

Скорость смещения провала при увеличении кривизны слабо зависит от длины волокна-вставки. Изменение направления его изгиба практически не влияет на спектр пропускания структуры, что указывает на то, что механизм сдвига провалов не связан с возможной асимметрией волокна или места сварки. Также продемонстрировано, что положение и смещение провалов не зависит от типа (длины волны отсечки) подводящего волокна. Обнаруженное смещение провалов в спектрах пропускания может быть использовано при создании оптоволоконного датчика изгиба, отличающегося от датчиков на основе фотоиндуцированных решеток высокой температурной и радиационной стойкостью, близкой к стойкости самих оптических волокон, использованных при создании такого датчика.

Авторы благодарят Е.М.Лихачева и НЦВО РАН за проведенные измерения профиля показателя преломления волокна SM630. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-02-97034-р_поволжье_а).

1. Иванов О.В., Никитов С.А., Гуляев Ю.В. *УФН*, **176**, 175 (2006).
2. Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И., Фролов А.А. *Квантовая электроника*, **24**, 805 (1997).
3. Терентьев В.С. *Автометрия*, **48**, 41 (2012).
4. Liu Y., Wei L. *Appl. Optics*, **46**, 2516 (2007).
5. Kumar D., Sengupta S., Ghorai S.K. *Meas. Sci. Technol.*, **19**, 065201 (2008).
6. Chen T.-J. *Opt. Lett.*, **29**, 2852 (2004).
7. Frazão O. et al. *Opt. Lett.*, **31**, 2960 (2006).
8. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Гурбатов С.О. *Квантовая электроника*, **41**, 821 (2011).
9. Dong X., Su L., Shum P., et al. *Opt. Commun.*, **258**, 159 (2006).
10. Ivanov O.V. *Opt. Commun.*, **282**, 3895 (2009).
11. Chen W., Lou Sh., Wang L., et al. *Opt. Commun.*, **284**, 2829 (2011).
12. Мажирин Ю.А., Мельников Л.А. *Оптика и спектроскопия*, **107**, 480 (2009).
13. Choi H.Y. et al. *Opt. Lett.*, **33**, 812 (2008).
14. Иванов О.В. В сб. *Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2011* 224 (2011).
15. Block U.L., Dangui V., Dignonnet M.J.F., Fejer M.M. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 1027 (2006).