

Предисловие к юбилейному номеру

Великие люди не умирают. Они уходят в вечность. В январе 2002 года ушел в вечность Александр Михайлович Прохоров, которому 11 июля 2006 года исполнилось бы 90 лет.

Бессмертие Александра Михайловича Прохорова, прежде всего, определено его работами, его неоценимым вкладом в мировую науку, изменившим облик мира и обеспечившим новое качество жизни.

Но это не единственная причина его бессмертия. Это хорошо понимают близко знавшие его люди. Он был очень мудрым и добрым человеком и сделал много добра окружающим. От этого и люди стали добрее, и частички этого добра будут передаваться из поколения в поколение.

Дело его жизни продолжает жить и развиваться. Одним из доказательств этого является представляемый номер журнала «Квантовая электроника». Авторы большинства статей, опубликованных в этом номере, имеют честь называться учениками Александра Михайловича и работать в созданном им Институте общей физики, носящем сейчас его имя. Надеюсь, что Александру Михайловичу не было бы стыдно за учеников его школы.

И.А.Щербаков

PACS 42.81.Bm; 42.81.Cn; 42.70.Qs

Разработка и исследование брэгговских световодов с большим размером поля моды и малыми оптическими потерями

М.Е.Лихачев, С.Л.Семенов, М.М.Бубнов, Е.М.Дианов, В.Ф.Хопин, М.Ю.Салганский, М.А.Гурьянов, А.Н.Гурьянов, Р.Жамие, П.Виале, С.Февриер, Д.-М.Блонди

Впервые получен образец брэгговского световода на основе кварцевого стекла с оптическими потерями менее 10 дБ/км. Брэгговский световод, изготовленный методом MCVD, предназначен для работы на длине волны 1.06 мкм и имеет диаметр модового пятна 18.5 мкм (площадь пятна моды 270 мкм²). Установлено, что разработанный световод обладает значительно более низкой чувствительностью к изгибу, чем имеющие такой же размер модового пятна световоды со ступенчатым профилем показателя преломления и микроструктурированные световоды. Продемонстрирована возможность создания брэгговского световода с рекордной для световодов, целиком состоящих из кварцевого стекла, площадью модового пятна (530 мкм² на рабочей длине волны 866 нм).

Ключевые слова: волоконная оптика, брэгговские световоды, световод с большим размером пятна моды.

1. Введение

Разработка волоконных лазеров, генерирующих излучение большой мощности – свыше 100 Вт в непрерывном режиме и со средней мощностью более 10 Вт в импульсном, – является одним из новейших направлений развития волоконной оптики. Основная проблема при создании таких лазеров заключается в появлении нежелательных нелинейных процессов – вынужденного рас-

сеяния Манделъштама – Бриллюэна или вынужденного комбинационного рассеяния, а также четырехфотонного смешения, приводящих к резкому уменьшению эффективности этих лазеров, а в случае мощных волоконных усилительных каскадов – к искажению формы усиливаемого импульса. Особенно актуальна данная проблема при создании импульсных волоконных лазеров, пиковая мощность которых может достигать десятков и даже сотен киловатт. Ключом к ее решению является использование волоконных световедущих структур с увеличенным сечением поля основной моды (и, как следствие, с уменьшенной плотностью мощности излучения в сердцевине).

Одномодовые световоды со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП) вследствие технологических (сложность изготовления и контроля параметров световодов с разностью показателей преломления (ПП) сердцевины и оболочки менее 1×10^{-3}) и физических (большие изгибные потери) ограничений не позволяют получать поле моды достаточно большого размера. Диаметр сердцевины в таких световодах при работе на основной моде ограничен величиной около 15λ (λ – дли-

М.Е.Лихачев, С.Л.Семенов, М.М.Бубнов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова 38; e-mail: likhachev@fo.gpi.ru, sls@fo.gpi.ru, bubnov@fo.gpi.ru, dianov@fo.gpi.ru

В.Ф.Хопин, М.Ю.Салганский, М.А.Гурьянов, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: vkhopin@mail.ru, misalgan@yandex.ru, tvs@ihps.nnov.ru

R.Jamier, P.Viale, S.Fevrier, J.-M.Blondy. XLIM, Research Institute, UMR CNRS n°6172 Université de Limoges, 123 Avenue A. Thomas, 87060 Limoges, France; e-mail: sebastien.fevrier@xlim.fr

Поступила в редакцию 28 декабря 2005 г., после доработки – 17 мая 2006 г.

на волны, на которой используется световод; в случае световодов со ступенчатым ППП это длина волны отсечки второй моды λ_c). Диаметр поля основной моды может быть увеличен до 30λ [1] при использовании маломодовых световодов. Намотка такого световода на катушку определенного радиуса позволяет, с одной стороны, отфильтровать высшие моды, а с другой – сохранить низкий уровень потерь для основной моды. Однако качество пучка на выходе подобной конструкции ухудшается ($M^2 \simeq 1.4$), а кроме того, необходимость работы со световодами, изогнутыми с определенным радиусом, существенно ограничивает область их применений. Как следствие, практическое применение находят лишь световоды с размером сердцевин в диапазоне $(11 - 20)\lambda$.

В последнее время все большее внимание уделяется микроструктурированным световодам, в частности полностью одномодовым световодам (endlessly single-mode fibers) [2, 3]. Продемонстрировано, что микроструктурированные световоды позволяют достичь большого диаметра пятна моды ($\sim 17\lambda$) при пониженных изгибных оптических потерях [4]. Размер сердцевин может быть увеличен вплоть до 40λ при работе световода в маломодовом режиме [5]. Так же как и в случае световодов со ступенчатым ППП, одним из факторов, затрудняющих применение микроструктурированных световодов, являются высокие изгибные потери. Кроме того, сложность технологии изготовления не способствует их широкому распространению.

Для создания волоконных структур с большим полем моды гораздо более предпочтительным является использование широко распространенной технологии модифицированного осаждения из газовой фазы (MCVD) [6]. Относительно недавно в работе [7] была продемонстрирована возможность изготовления MCVD-методом принципиально новой волноведущей структуры – брэгговского световода с большим размером поля моды. В отличие от световодов со ступенчатым ППП, а также от микроструктурированных световодов, в которых свет распространяется по сердцевине вследствие полного внутреннего отражения, в брэгговских световодах локализация света в сердцевине осуществляется за счет резонансного отражения одномодового излучения от кольцевых слоев с высоким показателем преломления, окружающих сердцевину. Авторами работы [7] была разработана структура брэгговского световода, оптимизированная для работы на длине волны 1.55 мкм, с диаметром сердцевин 34 мкм (22λ) и эффективной площадью моды 517 мкм² (диаметр поля моды 17λ). При одинаковых размерах поля моды данный брэгговский световод имел значительно меньшие изгибные потери, чем световод со ступенчатым ППП. В то же время потери этого световода на вытекание излучения были очень высоки (около 0.6 дБ/м), что делало его непригодным для большинства практических приложений.

Позднее брэгговская структура, предложенная в работе [7], была нами оптимизирована, что позволило впервые получить брэгговский световод с оптическими потерями менее 10 дБ/км [8]. Настоящая работа посвящена исследованию свойств брэгговских световодных структур с большим диаметром сердцевин (свыше 20λ) и пониженными потерями на вытекание излучения. В работе также продемонстрирована возможность увеличения размера сердцевин брэгговского световода до 46λ .

2. Оптимизация профиля ПП брэгговского световода с большим размером поля моды

Типичная структура брэгговского световода показана на вставке рис.1. Сердцевина, ПП которой такой же, как у кварцевого стекла или ниже, окружена кольцевыми слоями с высоким и низким ПП. В подобной структуре возможно распространение локализованной в сердцевине моды, которую далее мы будем называть брэгговской. Постоянная распространения брэгговской моды β меньше постоянной распространения излучения в нелегированном кварцевом стекле, из которого сформирована внешняя оболочка световода (часть поперечного сечения световода снаружи кольцевой структуры). Это приводит к наличию у такой моды оптических потерь на вытекание. В каждом кольцевом слое с высоким ПП происходит «отражение» вытекающей мощности – поток энергии в радиальном направлении уменьшается в

$$\frac{k^2 n_H^2 - \beta^2}{k^2 n_L^2 - \beta^2} = \frac{n_H^2 - n_{\text{eff}}^2}{n_L^2 - n_{\text{eff}}^2} \quad (1)$$

раз [9]. Здесь n_H , n_L – максимальный и минимальный ПП кольцевых слоев; k – волновое число;

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k} \quad (2)$$

– эффективный ПП брэгговской моды.

Таким образом, оптические потери брэгговской моды на вытекание могут быть снижены путем увеличения числа слоев с высоким ПП либо увеличения контраста такой структуры (разности между максимальным и минимальным ПП слоев $\Delta n = n_H - n_L$). В данной работе с целью уменьшения общего размера создаваемой структуры и технологических сложностей, связанных с осаждением большого количества слоев, было решено остановиться на брэгговской структуре всего с тремя слоями с высоким ПП. На рис.1 показаны оптические потери на вытекание, рассчитанные в такой структуре при диаметре сердцевин 22.5 мкм и различных значениях n_H (и соответственно Δn). Видно, что рост Δn от 0.005 (как в работе [7]) до 0.015 позволяет снизить оптические потери на вытекание почти на два порядка.

Толщина и положение слоев выбирались таким образом, чтобы на рабочей длине волны 800 нм оптические потери основной моды были достаточно малыми, а коэффициенты затухания высших мод, наоборот, значительными. Так, оптические потери моды LP₁₁, обладаю-

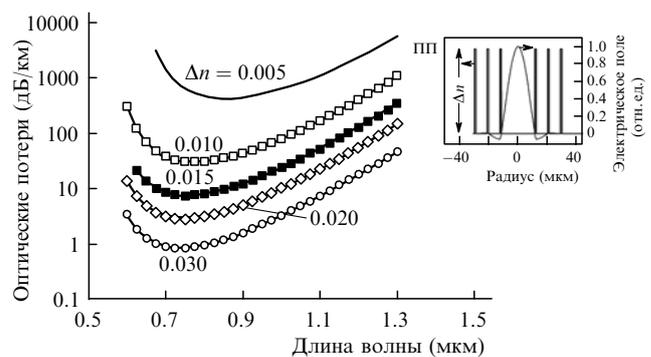


Рис.1. Рассчитанные теоретически спектральные зависимости оптических потерь на вытекание в брэгговском световоде. На вставке – спроектированный ППП такого световода.

щей из всех высших мод самыми низкими оптическими потерями, превышают 0.5 дБ/м для $\Delta n = 0.015$. Как следствие, спроектированный брэгговский световод, не являясь одномодовым в общепринятом смысле, будет проявлять свойства одномодового при длине световода более нескольких метров.

Как видно из рис. 1, оптические потери основной брэгговской моды можно снизить до уровня 1 дБ/км лишь при условии $\Delta n > 0.030$. В то же время гораздо более эффективным является создание слабой депрессии (понижения) n_L слоев с низким ПП относительно ПП сердцевины n_{core} . В этом случае формула (1) уже неприменима – знаменатель $kn_L^2 - \beta^2$ становится равным либо меньшим нуля уже при депрессии $n_{\text{core}} - n_L = (2 - 3) \times 10^{-4}$, а точный расчет показывает, что оптические потери брэгговской моды на вытекание снижаются до уровня, меньшего 0.1 дБ/км при $\Delta n = 0.015$.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Брэгговский световод с размером сердцевины 24λ

Брэгговский световод BF503 с внешним диаметром 170 мкм был вытянут из заготовки, изготовленной методом MCVD. Измеренный в этом световоде ППП показан на рис. 2. Депрессия показателей преломления слоев с низким ПП относительно ПП сердцевины составила около 2×10^{-4} . Для уменьшения изгибных потерь снаружи кольцевой брэгговской структуры (на расстоянии 37–42 мкм от оси световода) был создан дополнительный кольцевой слой с пониженным ПП преломления [7]. В первую очередь была проверена одномодовость изготовленного световода. Изображение брэгговской моды в ближнем поле после прохождения 30-метрового участка световода, сделанное при помощи ИК камеры, показано на вставке рис. 2. Здесь же приведено измеренное в ближнем поле распределение интенсивности оптического поля в брэгговском световоде, которое, как можно видеть, хорошо совпадает с расчетным. Диаметр распределения плотности мощности основной моды этого световода по уровню $1/e^2$ оказался равным 18.5 мкм на длине волны 1.064 мкм. Эффективная площадь моды составила 270 мкм².

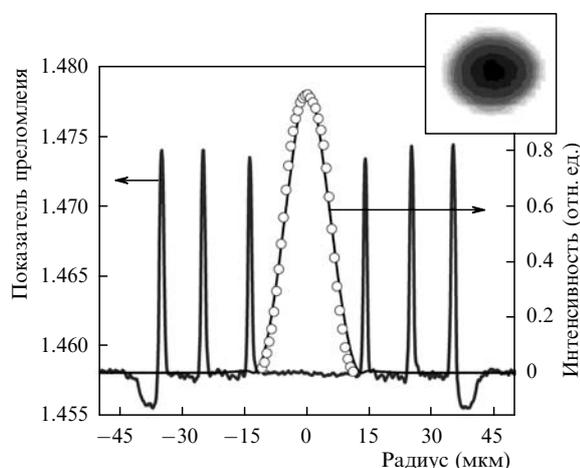


Рис. 2. ППП брэгговского световода BF503. Расчетное (сплошные кривые) и измеренное (точки) распределения интенсивности оптического поля брэгговской моды в ближней зоне. На вставке – фотография указанного распределения.

Измерение оптических потерь в световоде BF503 проводилось методом последовательного уменьшения длины световода (метод обламывания). В созданной кольцевой световодной структуре помимо брэгговской моды могут распространяться также моды, локализованные в слоях с высоким ПП. Для того чтобы устранить влияние этих мод при измерении оптических потерь, ввод излучения в брэгговский световод и вывод излучения из него необходимо осуществлять при помощи обычного одномодового световода (рис. 3). В данной работе стыковка брэгговского и одномодового световодов осуществлялась при помощи сварки, что обеспечивало высокую воспроизводимость результатов измерений (~ 0.1 дБ) и позволяло измерять оптические потери вплоть до уровня 10 дБ/км на отрезках брэгговского световода длиной всего лишь 20 м. На рис. 3 приведен также спектр оптических потерь в образце световода длиной 30 м, намотанном на катушку диаметром 40 см. Результаты измерений показывают, что оптические потери на длине волны 1064 нм в исследуемом световоде не превышают 10 дБ/км.

В результате дальнейших исследований установлено, что этот уровень оптических потерь в значительной степени обусловлен вкладом изгибных потерь. Оптические потери, измеренные в прямом световоде, оказались значительно ниже, однако вследствие небольшой измеряемой длины прямого световода достоверно удалось измерить лишь часть спектра (в диапазоне 1400–1600 нм), где оптические потери на вытекание достаточно высоки. В то же время можно видеть, что спектральная зависимость оптических потерь в выпрямленном световоде близка к экспоненциальной. Если экстраполировать измеренную кривую 2 (рис. 3) в область более коротких длин волн, то потери основной моды на вытекание на длине волны 1064 нм можно оценить в 0.05–0.5 дБ/км, что соответствует теоретическим оценкам (см. разд. 2). Таким образом, в выпрямленном световоде BF503 оптические потери основной моды на длине волны 1064 нм определяются не столько вытеканием излучения, сколько собственными оптическими потерями на данной длине волны (0.6 дБ/км – уровень потерь на рэлеевское рассеяние).

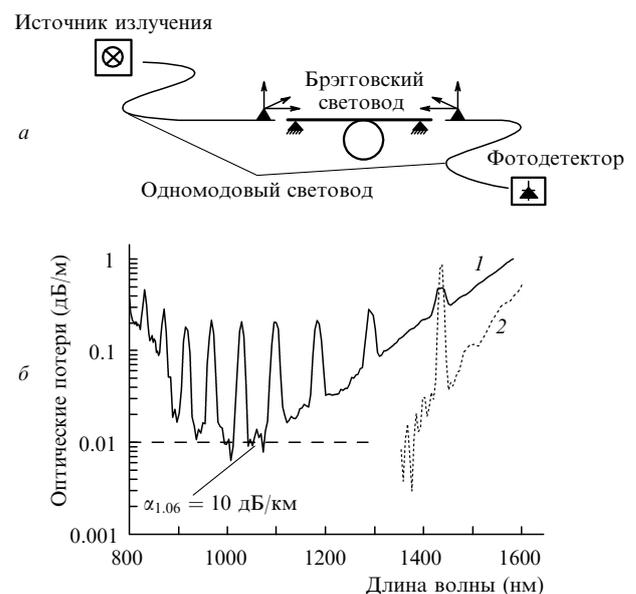


Рис. 3. Схема измерения оптических потерь в брэгговском световоде (а) и спектр оптических потерь в световоде длиной 30 м при радиусе изгиба 20 см (1) и в прямом световоде длиной 3 м (2) (б).

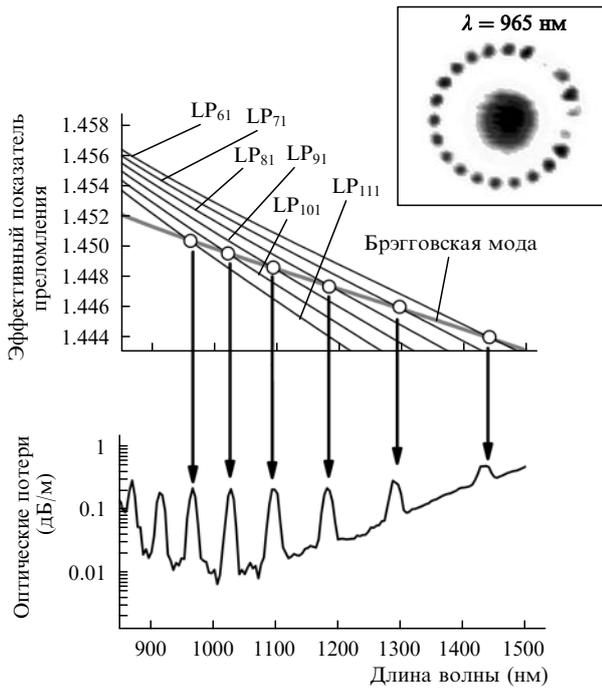


Рис.4. Зависимость от длины волны эффективного ПП мод первого кольца, локализованных в кольцевом слое с высоким ПП и наименьшим радиусом (вверху), и спектр оптических потерь (внизу). На вставке – изображение торца световода при возбуждении одной из мод первого кольца в случае распространения брэгговской моды на длине волны 965 нм.

Необходимо отметить, что в спектре оптических потерь как изогнутого, так и выпрямленного световода имели место пики повышенных потерь (на $\lambda = 1027, 1099, 1183, 1291$ и 1433 нм), которые не были предсказаны теоретически. Как показало наблюдение выходного торца брэгговского световода при помощи ИК камеры, на этих длинах волн присутствует мода, локализованная в ближайшем к сердцевине кольце с высоким ПП (вставка на рис.4). Теоретический анализ показал, что на данных длинах волн постоянные распространения брэгговской моды и одной из мод внутреннего кольца с высоким ПП оказываются равными. Как следствие, на этих длинах волн происходит обмен энергией между брэгговской и кольцевой модами, что и приводит к уменьшению мощности, распространяющейся в брэгговской моде, и к появлению пиков в спектре оптических потерь.

3.2. Изгибные потери в различных световедущих структурах с большим размером поля моды

Конструктивные возможности создания новых одномодовых световедущих структур с очень большим диаметром пятна моды в значительной степени ограничены высокими изгибными потерями. Характерной чертой таких структур является необходимость работы с практически прямыми световодами, что в большинстве приложений невыполнимо. В связи с этим исследование и сравнение чувствительности к изгибам световедущих структур разных типов представляет безусловный интерес. В данной работе изгибные потери измерялись для брэгговского световода BF503 и одномодового световода Ge525sm с приблизительно таким же диаметром пятна моды (19 мкм) и длиной волны отсечки второй моды 1000 нм (рис.5). Распределение электрического поля и ППП в световоде со ступенчатым профилем показаны на встав-

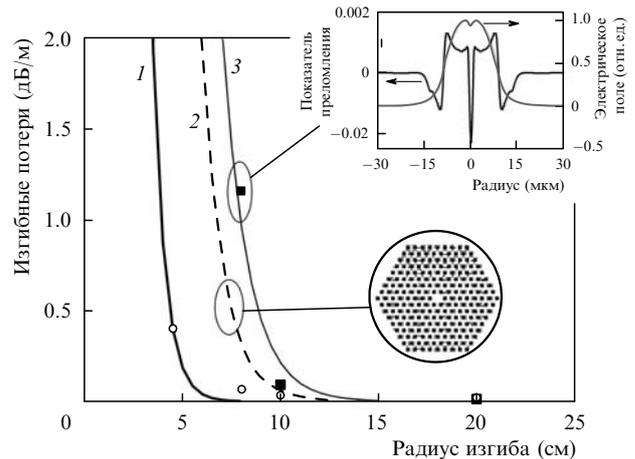


Рис.5. Изгибные потери в световодных одномодовых структурах различных типов (кривые – расчет, точки – эксперимент): 1 – брэгговский световод; 2 – световод со ступенчатым ППП; 3 – микроструктурированный световод с параметрами $A = 15$ мкм, $d/A = 0.44$, $N = 8$ (A – расстояние между капиллярами, d – размер капилляров, N – число рядов капилляров). На вставке – распределение электрического поля и ППП в световоде со ступенчатым профилем.

ке рис.5. Для обоих типов световодов изгибные потери рассчитывались методом конечных элементов. Аналогичные расчеты были проведены и для микроструктурированного световода с таким же диаметром поля моды. Можно видеть хорошее соответствие между измеренными и расчетными значениями изгибных потерь для брэгговского световода и световода со ступенчатым ППП. Это позволяет предположить, что расчеты изгибных потерь в микроструктурированном световоде также обладают высокой степенью достоверности. Полученные данные показывают, что из трех рассмотренных типов световодов наименее чувствительным к изгибам оказался брэгговский световод. Изгибные потери в нем достигают 0.5 дБ/м при радиусе изгиба $R = 4.5$ см, тогда как в микроструктурированном световоде – при $R = 7.5$ см, а в световоде со ступенчатым ППП – при $R = 9$ см.

3.3. Потери на сварку брэгговских световодов и световодов со ступенчатым ППП

Для многих практических применений не менее важным фактором, чем изгибные потери, являются потери на соединение или сварку разрабатываемых специальных световодов с обычными одномодовыми световодами, для которых элементная база волоконной оптики (решетки показателя преломления, ответвители и пр.) хорошо развита.

Оптические потери на сварку определялись для световодов BF503 и Ge525sm с внешним диаметром 125 мкм, оптимизированных для работы на длине волны 800 нм. Выбор этих световодов был обусловлен возможностями стандартного аппарата, используемого для сварки световодов. Оптические потери при сварке измерялись в два этапа. Первое измерение спектра сигнала осуществлялось при прохождении света через одномодовый световод Ge525sm, диаметр поля моды которого (12.8 мкм, длина волны отсечки $\lambda_c = 0.8$ мкм) был наиболее близок к диаметру моды брэгговского световода BF503 (14.5 мкм). На втором этапе световод Ge525sm разрезался по середине и к его концам приваривался двухметровый образец световода BF503. По изменению уровня сигнала относительно первого измерения определялись оптиче-

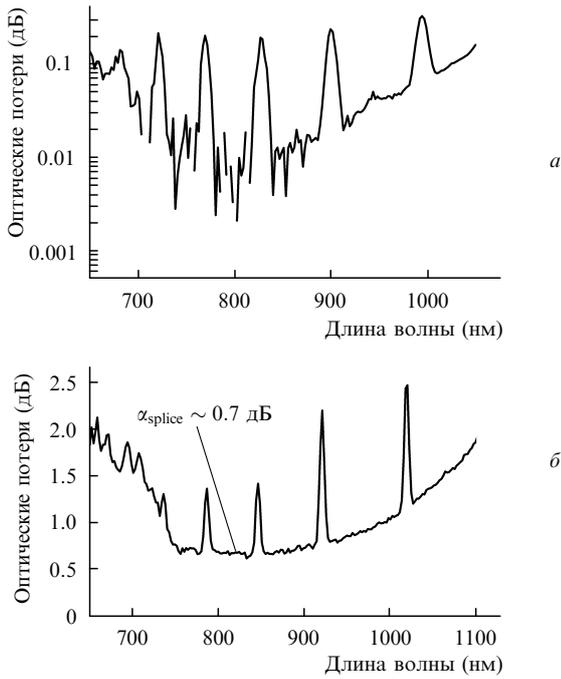


Рис.6. Спектры оптических потерь в отрезке световода BF503 с внешним диаметром 125 мкм (а) и в точке сварки с одномодовым световодом со ступенчатым ППП (б).

ские потери на сварку. (Учитывалось, что в данном случае оптические потери вносились в двух точках сварки.) Спектр оптических потерь, приведенный на рис.6, показывает, что при сварке со световодом Ge525sm потери не превышали 0.7 дБ (на одну точку сварки). Это значение слабо изменялось при варьировании диаметра поля моды световода Ge525sm от 12 до 12.8 мкм (за счет варьирования внешнего диаметра), что позволяет считать причиной наблюдаемого уровня оптических потерь различие в распределениях полей мод в брэгговском и обычном одномодовом световодах.

Тем не менее полученные данные показывают, что мода брэгговского световода достаточно хорошо согласуется с модой обычного одномодового световода и, возможно, более тщательный подбор диаметра поля моды и ППП стыкуемого световода позволит снизить оптические потери на сварку брэгговского и обычного световодов.

3.4. Брэгговский световод с размером сердцевинки 46λ

Депрессия показателя преломления кольцевых слоев с низким ППП относительно ППП сердцевинки по сути обеспечивает некое совмещение принципов действия брэгговской структуры и структуры с полным внутренним отражением. В данном случае брэгговская мода оказывается практически точным аналогом моды LP₀₄, которая могла бы распространяться в предложенной структуре, если бы вместо депрессии слоев с низким ППП на ту же величину Δn был повышен ППП сердцевинки (либо ППП всей структура был целиком увеличен на $(2 - 3) \times 10^{-4}$). Потери на вытекание в этом случае в прямом световоде равны нулю, а чувствительность к изгибам должна быть такой же, как в структуре с депрессией слоев с низким ППП. Подобная структура, продемонстрированная на примере световода BF503, оказывается крайне эффективной с точки зрения одновременного снижения потерь на вытекание и изгибных потерь. Однако дальнейшее увеличе-

ние диаметра сердцевинки (для фиксированной рабочей длины волны) в таких структурах представляется проблематичным. Действительно, разность ППП $n_{\text{core}} - n_L$ в структуре с диаметром сердцевинки порядка 40λ не должна заметно превышать 1×10^{-4} , в противном случае в такой световодной структуре станет возможным распространение с малыми потерями высших мод – в первую очередь брэгговской моды LP₁₁ (аналог моды LP₁₄ в «приподнятой» структуре). В процессе изготовления заготовки контроль ППП с такой точностью представляется крайне проблематичным, что делает невозможным дальнейшее увеличение диаметра сердцевинки.

В то же время одним из интересных свойств световодных структур, в которых распространение света вдоль оси световода обеспечивается не полным внутренним отражением, а резонансным отражением от внешних кольцевых слоев, является уменьшение оптических потерь на вытекание при увеличении размера сердцевинки [10, 11]. Вследствие этого можно ожидать, что оптические потери в брэгговском световоде с депрессированной сердцевинкой и большим диаметром поля моды будут не слишком велики даже при небольшом (≥ 3) числе слоев с высоким ППП. Действительно, как показывают теоретические расчеты, для брэгговского световода, представленного на рис.7,а (число слоев равно трем, депрессия ППП сердцевинки относительно слоев с низким ППП $n_L - n_{\text{core}} = 0.0005$, диаметр сердцевинки 46λ) можно достичь оптических потерь на вытекание, не превышающих 50 дБ/км (рис.7,б).

Подобная конструкция была реализована при помощи MCVD-метода. Профиль ППП полученной структуры и измеренные оптические потери в этом световоде показаны на рис.8. За внешним кольцом с высоким ППП (как и в случае световода BF503) находился депрессированный

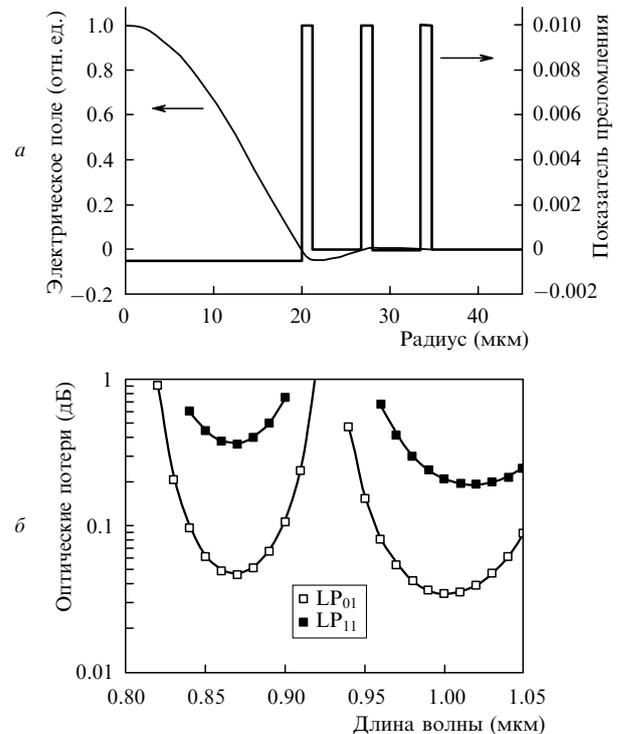


Рис.7. ППП брэгговского световода с депрессированной сердцевинкой и рассчитанное распределение электрического поля основной моды (а), а также рассчитанный спектр оптических потерь на вытекание (б).

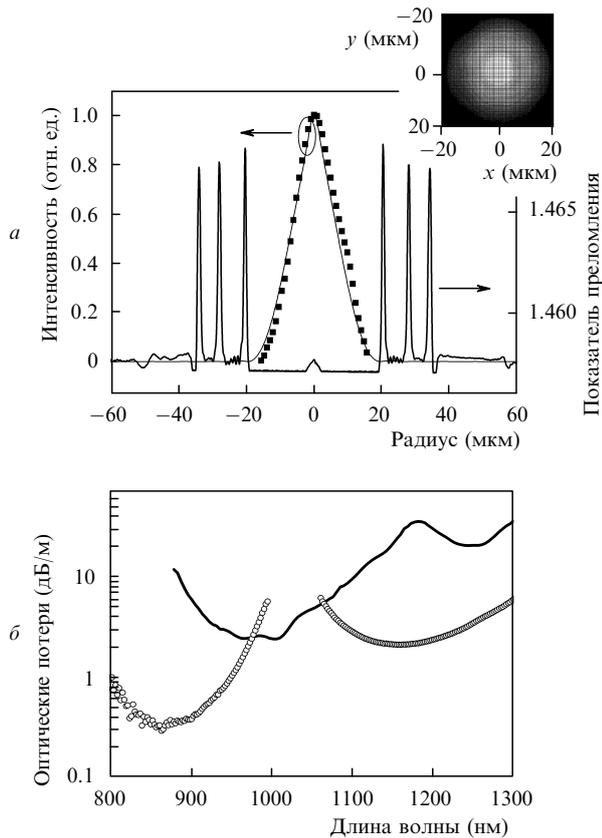


Рис.8. ППП брэгговского световода BF541, изготовленного методом MCVD, и рассчитанное и измеренное распределения интенсивности оптического поля брэгговской моды в ближней зоне (а), а также измеренный спектр оптических потерь в прямом световоде (точки) и световоде с радиусом изгиба 20 см (сплошная кривая) (б) На вставке – картина излучения световода в ближней зоне.

кольцевой слой, добавленный для уменьшения изгибных потерь. Хотя структура световода получилась не совсем оптимальной (положение последнего слоя отличается от заданного, а ПП сердцевинки n_{core} на 0.0005 ниже заданного), оптические потери в таком световоде оказались достаточно малыми (0.3 дБ/м на длине волны $\lambda = 866$ нм). Диаметр распределения плотности мощности моды в созданной структуре составил 26 мкм (30λ), а эффективная площадь пятна моды – 530 мкм² (см. вставку на рис.8).

Оптические потери в изогнутом световоде в предложенной конструкции достаточно велики, чего и можно было ожидать для световода со столь большим диаметром пятна моды. Интересно отметить, что при изгибе, помимо общего повышения уровня оптических потерь, наблюдается сдвиг длины волны минимальных оптических потерь, вследствие чего увеличивается чувствительность брэгговского световода к изгибам на длине волны минимальных оптических потерь.

4. Заключение

Проведена оптимизация конструкции брэгговского световода, которая позволила впервые получить в брэгговской световедущей структуре оптические потери менее 10 дБ/км при радиусе изгиба 20 см. Обнаружено, что разработанный брэгговский световод с диаметром сердцевинки 24λ и всего тремя слоями с высоким ПП обладает значительно меньшей чувствительностью к изгибам, чем световоды со ступенчатым ППП и микроструктурированные световоды с таким же размером поля моды. Впервые продемонстрирована возможность создания одномодовой световедущей структуры с размером поля моды 30λ при помощи стандартной MCVD-технологии.

1. Jeong Y., Sahu J.K., Payne D.N., Nilsson J. *Opt. Express*, **12**, 6088 (2004).
2. Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **22**, 961 (1997).
3. Knight J.C., Birks T.A., Cregan R.F., Russel P.St.J., de Sandro J.-P. *Electron. Lett.*, **34**, 1347 (1998).
4. Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N.A. *Electron. Lett.*, **39**, 1802 (2003).
5. Limpert J., Liem A., Reich M., Schreiber T., Nolte S., Zellmer H., Tunnermann A. *Opt. Express*, **12**, 1313 (2004).
6. Jablonski D.P. *J. Lightwave Technol.*, **LT-4**, 1016 (1986).
7. Février S., Viale P., Gerome F., Leproux P., Roy P., Blondy J.-M., Dussardier B., Monnom G. *Electronics Lett.*, **39**, 1240 (2003).
8. Février S., Jamier R., Blondy J.-M., Semjonov S. L., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Dianov E.M., Khopin V.F., Salganskii M.Y., Guryanov A.N. *Proc. ECOC'2005* (Glasgow, UK, 2005, v. 6, p. 41, paper Th4.4.3).
9. Yeh P., Yariv A. *J. Opt. Soc. Am.*, **68**, 1196 (1978).
10. Johnson S.G., Ibanescu M., Skorobogatiy M., Weisberg O., Engness T.D., Soljacic M., Jacobs S.A., Joannopoulos J.D., Fink Y. *Opt. Express*, **9**, 748 (2001).
11. West J.A., Smith C.M., Borrelli N.F., Allan D.C., Koch K.W. *Opt. Express*, **12**, 1485 (2004).