

Одномодовый волоконный световод с дополнительным кольцевым световодом для двухканальной связи и специальных применений

М.И.Беловолов*, М.М.Бубнов*, Е.М.Дианов*, С.Л.Семенов*, А.Н.Гурьянов**, В.Ф.Хопин**, А.С.Беланов***, В.И.Кривенков***, С.Г.Синев*, И.А.Кращенко*, А.М.Беловолов*

Для двухканальной связи и специальных применений впервые разработаны двухканальные концентрические волоконные световоды с широкополосным одномодовым световодом на 1.3 мкм и дополнительным многомодовым кольцевым световодом толщиной 10 мкм при внешнем диаметре световода 125 мкм. Оптическое затухание как по одномодовому световоду, так и по кольцевому сердечнику составило менее 1 дБ/км, переходное затухание между каналами – свыше 40 дБ. Обнаружена зависимость оптического затухания в кольцевом световоде от радиуса изгиба и усилия натяжения при намотке его на катушки и найдены оптимальные параметры профиля показателя преломления, в частности Δn для кольца, при которых достигаются минимальные потери в кольцевом световоде как на катушках, так и в распрямленном состоянии. Построена волоконно-оптическая линия длиной 12 км и исследовано распределение затухания по ее длине. Показано, что распределенная связь между каналами в разработанных световодах практически отсутствует и сохраняется высокая оптическая развязка между каналами.

Ключевые слова: кольцевой световод, двухканальный световод, профиль показателя преломления, переходное затухание между каналами, оптическое затухание.

1. Введение

Волоконные световоды с усложненным профилем показателя преломления представляют интерес для ряда специальных применений, поскольку выбором параметров световодов можно оптимизировать свойства каналов передачи информации, придав им новые функции. Двухканальные световоды с концентрической геометрией были предложены сравнительно давно [1–3]. Сердцевина и кольцевой световод изготавливались многомодовыми, и их параметры подбирались такими, чтобы обеспечить удобное возбуждение источниками излучения и оптическую развязку между каналами на уровне ~20 дБ, что считалось достаточным для отдельной передачи цифровых и аналоговых световых потоков в системах двухканальной или дуплексной связи. Вследствие очень малых поперечных размеров и веса, а также того, что световоды являются полностью диэлектрическими волноводами и не подвержены электромагнитным наводкам, двухканальные концентрические световоды представляют значительный интерес для применения в авиации, космических летательных аппаратах, в системах связи и телеуправления подвижными объектами, а также в ряде других приложений.

Немаловажно, что для изготовления концентрических заготовок может быть использована хорошо разработанная технология внутреннего осаждения из газовой

фазы (MCVD-технология) [3], а для вытяжки – то же оборудование, что и для традиционных связных световодов. Внешний диаметр использованных в работе [1] световодов (180 мкм) всего на 55 мкм отличался от диаметра стандартных световодов, что позволяло срывать в линию такие световоды с помощью обычной сварочной техники. Для облегчения сопряжения с источниками излучения диаметры сердцевины обычно выбирались равными 20–30 мкм, а кольцо удалялось на расстояние не менее 20 мкм, чтобы обеспечить необходимую оптическую развязку каналов и уменьшить влияние технологии на потери в них и перекрестные помехи.

Другой разновидностью концентрических световодов является одномодовый световод с дополнительным световедущим тонким кольцевым световодом (трубкой), который находится на малом расстоянии от одномодовой сердцевины (менее 10 мкм). Работа такого двухканального световода основана на распределенной связи между каналами, которая реализуется при близких или равных постоянных распространения, приводя к периодической по длине световода перекачке излучения из сердцевины в кольцо и обратно. В работе [4] на основе теории Маркузе [5] рассмотрены свойства таких коаксиально связанных световодов с точки зрения возможности создания на их основе волоконно-оптических датчиков с управлением распределенной связью внешним физическим воздействием.

В настоящей работе мы ставили перед собой задачу создания и исследования двухканальных концентрических световодов со структурой, не исследованной в упомянутых выше работах [1–4]. Сердцевина этой структуры является одномодовым волоконным световодом на 1.3 мкм, а дополнительный кольцевой световод с шириной кольца ~10 мкм удален от сердцевины на расстояние, обеспечивающее максимальную оптическую развязку между каналами (желательно в диапазоне 40–70 дБ)

*Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики РАН, Россия, 119991 Москва, ул.Вавилова, 38; тел.: (095) 132 83 09; факс: (095) 135-81-39, e-mail: bmi@fo.gpi.ru

**Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

***Московская государственная академия приборостроения и информатики, Россия, 107846 Москва, ул. Стромынка, 20

при внешнем диаметре световода 125 мкм. При такой геометрии световода по одномодовой сердцевине может осуществляться широкополосная передача информации, а по кольцевому световоду может попутно или встречно передаваться контрольно-измерительная информация, команды управления или сигналы интерактивной связи.

Главные проблемы, возникающие при создании таких световодов, заключаются в достижении достаточно высокой оптической развязки каналов и малых оптических потерь, а также в практической возможности изготовления устройств раздельного возбуждения и вывода информации из каналов. Важно также, чтобы такие световоды можно было сращивать в линию как обычные связанные световоды с помощью стандартной сварочной аппаратуры, что позволило бы решить проблему их использования. Концентрическая геометрия наиболее полно удовлетворяет этим пожеланиям.

Достоинством рассматриваемой нами конструкции световода является возможность проведения предварительного теоретического анализа ее параметров. Благодаря наличию коаксиальной структуры двухканального световода с одномодовым световодом по центру существенно уменьшается число уравнений, позволяющих строить теоретическую модель и проводить численное моделирование таких световодов перед разработкой технологии изготовления. Это существенно отличает предлагаемую нами конструкцию двухканального световода от ранее рассмотренных вариантов с многомодовыми световодами как по центру, так по кольцу, при которых приходилось руководствоваться или общими соображениями из волноводной теории, или делать существенные упрощающие предположения при теоретическом рассмотрении, что вносило элементы неопределенности в предсказываемые результаты.

В нашем случае теоретическая задача решалась строго. Это позволило практически реализовать световоды в технологическом процессе, провести измерения их основных оптических свойств и создать двухканальные концентрические световоды с малыми потерями как в одномодовой сердцевине, так и в кольцевом световоде (~ 1 дБ/км). Оптическая развязка каналов при этом составила не менее 40 дБ.

2. Численное моделирование и анализ переходного затухания

Главными задачами численного моделирования являются расчет дисперсионных свойств одномодовой сердцевины с учетом наличия световедущего кольца и анализ переходного затухания из сердцевины в кольцо α_{cr} и из кольца в сердцевину α_{rc} в зависимости от ширины и радиуса кольца. Для более общего случая многоканального концентрического световода, состоящего из ряда чередующихся по оптической плотности слоев, в работе [2] проведен расчет перекрестных наводок с использованием теории слабосвязанных волн и даны рекомендации по выбору параметров волновода. Ясно, что в нашем случае для увеличения переходного затухания желательно уменьшить диаметр одномодовой сердцевины и повысить в ней скачок показателя преломления Δn_c . Профиль показателя преломления предлагаемого световода приведен на рис.1. Чтобы при изгибах основная мода одномодового световода HE_{11} не была вытекающей, мы выбрали $\Delta n_c > \Delta n_r$ – скачка показателя преломления кольца.

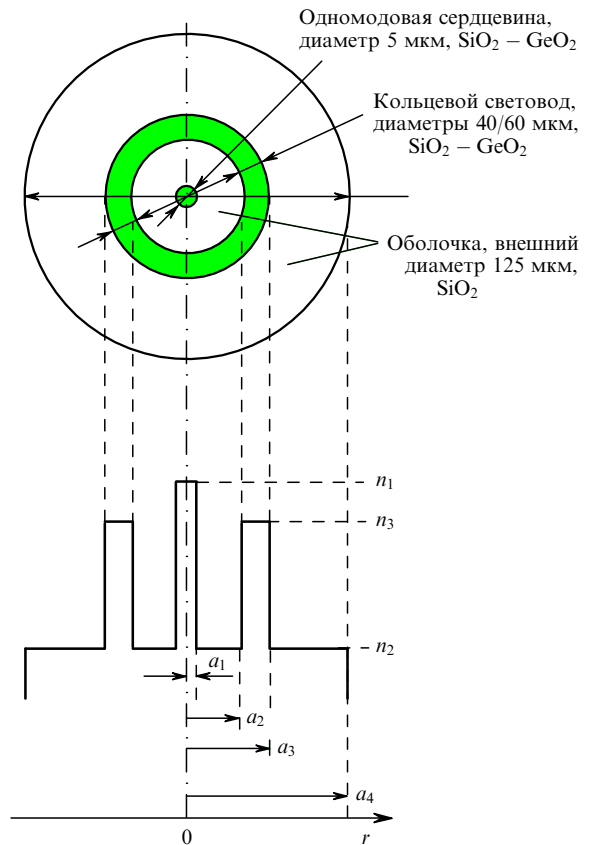


Рис.1. Структура сечения и профиль показателя преломления $n(r)$ концентрического двухканального волоконного световода.

Для цилиндрической геометрии световода поперечные составляющие поля E_r , E_ϕ , H_r , H_ϕ выражаются через продольные составляющие E_z и H_z [6]. Выражения для продольных составляющих мод анализируемого многослойного волокна внутри световодных слоев сердцевины и кольца с большими Δn_c и Δn_r имеют следующий вид:

$$E_{zi} = A_i J_i(k_i r) + B_i N_n(k_i r), \quad (1)$$

$$H_{zi} = C_i J_n(k_i r) + D_i N_n(k_i r),$$

где J_n и N_n – функции Бесселя первого и второго рода соответственно;

$$k_i^2 = k_0^2 (n_i^2 - n_{\text{eff}}^2) > 0 \quad (2)$$

– квадрат волнового числа моды в i -м слое световода; $k_0 = 2\pi/\lambda$; $n_{\text{eff}} = c/v_{\text{ph}}$ – эффективный показатель замедления фазовой скорости моды v_{ph} ; c – скорость света.

Вне световедущей сердцевины, в слоях оболочки с меньшим показателем преломления, для составляющих поля имеем

$$E_{zi} = A_i I_n(k_i r) + B_i K_n(k_i r), \quad (3)$$

$$H_{zi} = C_i I_n(k_i r) + D_i K_n(k_i r),$$

где I_n , K_n – модифицированные функции Бесселя первого и третьего рода, а волновое число мод в этом случае удовлетворяет условию

$$k_i^2 = k_0^2 (n_{\text{eff}}^2 - n_i^2) > 0. \quad (4)$$

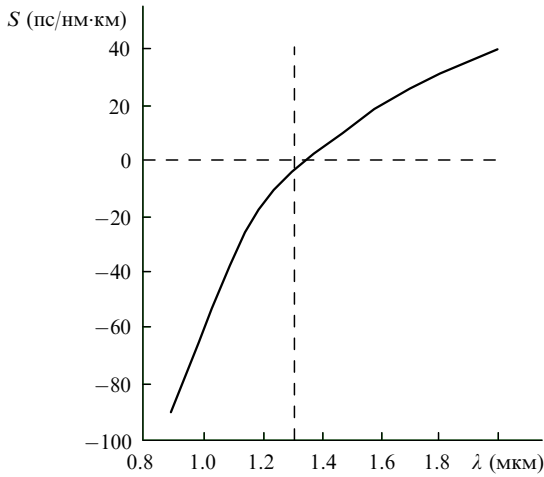


Рис.2. Расчетная зависимость коэффициента дисперсии S от длины волны λ для одномодовой сердцевины с дополнительным кольцевым световодом в концентрической структуре волоконного световода с внешним диаметром 125 мкм.

Для световода с $\Delta n_c > \Delta n_r$ необходимо принять коэффициенты $B_1 = D_1 = 0$, чтобы удовлетворить условию ограниченности поля на его оси, а для внешнего слоя световода необходимо принять $A_n = C_n = 0$, чтобы удовлетворить условию излучения поля моды на бесконечности.

Используя физические граничные условия для исследуемой структуры световода, получаем характеристическое уравнение, решение которого позволяет найти n_{eff} .

Для световодов с произвольным профилем показателя преломления была разработана программа расчета n_{eff} для различных типов мод, включая моду HE_{11} , которая также учитывала зависимость показателя преломления материала световода от длины волны λ [7]. Согласно найденным n_{eff} , для моды HE_{11} коэффициент дисперсии определялся по строгой формуле

$$S = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}. \quad (5)$$

Эта формула справедлива для любых Δn и учитывает материальную и волновую дисперсии.

Расчеты проведены для световодов со следующими параметрами: сердцевина диаметром $2a_1 = 4$ мкм из $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ (молярная концентрация 9%), $n_1 = 1.4623$

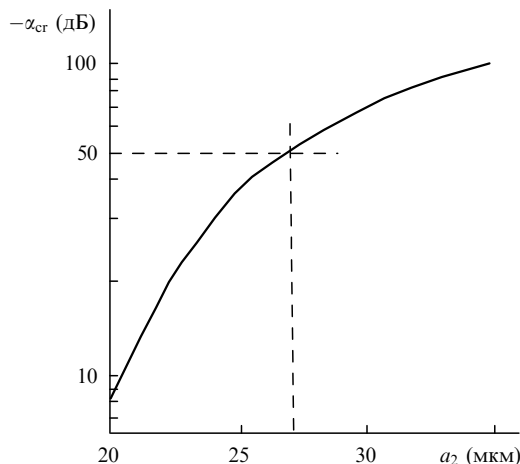


Рис.3. Расчетная зависимость переходного затухания из одномодовой сердцевины в кольцевой световод α_{cr} от радиуса кольца a_2 .

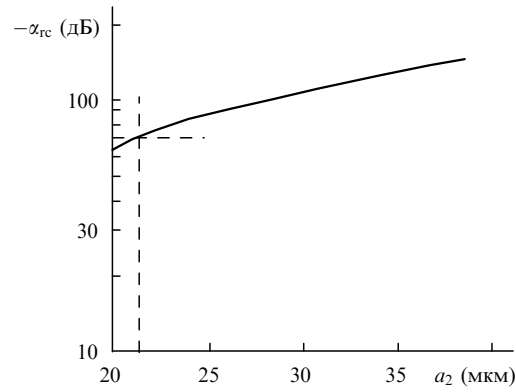


Рис.4. Расчетная зависимость переходного затухания из кольцевого световода в одномодовую сердцевину α_{rc} от радиуса кольца a_2 .

при $\lambda = 1.3$ мкм; внутренний радиус кольца $a_2 = 20, 25, 30$ или 35 мкм; световедущее кольцо толщиной 15 мкм из $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ (молярная концентрация 5.46 %) с $n_3 = 1.4548$; нелегированные промежуточные слои из SiO_2 с $n_2 = 1.4473$. Внешний диаметр световода $2a_4$ составлял 125 мкм. Для этого световода $\Delta n_c = n_1 - n_2 = 0.015$, $\Delta n_r = n_3 - n_2 = 0.0075$, числовая апертура кольцевого световода $NA = (n_3^2 - n_2^2)^{1/2} = 0.1475$ при $\lambda = 1.3$ мкм.

На рис.2 приведена зависимость коэффициента дисперсии S от λ для анализируемого световода. При $\lambda = 1.3$ мкм получаем $S = -2.62$ пс/нм-км; это значение практически не зависит от диаметра кольца при $a_2 = 20 - 30$ мкм.

Нормированная мощность P_r моды HE_{11} , распространяющейся в кольцевом слое толщиной $a_3 - a_2 = 15$ мкм, определяет переходное затухание из одномодовой сердцевины в кольцо, которое находилось по формуле $\alpha_{cr} = -10 \lg P_r$. Как видно из рис.3, оно сильно зависит от a_2 . При $a_2 > 27$ мкм переходное затухание α_{cr} может превышать 50 дБ.

При расчете переходного затухания из кольца в одномодовую сердцевину α_{rc} мы аппроксимировали распределение полей мод кольцевого световода распределением мод H_m плоского волновода толщиной $a_3 - a_2$ [8] и нашли суммарную нормированную долю мощности P_c этих мод, которая распространяется в одномодовом световоде при условии их равномерного возбуждения. На рис.4 приведена полученная зависимость $\alpha_{rc} = -10 \times \lg P_c$ от a_2 . При $a_2 > 20$ мкм $\alpha_{rc} > 60$ дБ.

Таким образом, численные расчеты показывают возможность достижения высокой оптической развязки каналов (более 50 дБ) при выборе соответствующих значений Δn и расстоянии между сердцевиной и внутренним радиусом кольца не менее 20 мкм.

3. Технология изготовления и синтез профиля показателя преломления

Для изготовления заготовок световодов использовалась обычная MCVD-технология осаждения слоев внутри опорной кварцевой трубки. Особенностью структуры профиля показателя преломления реальных кольцевых световодов является необходимость изготовления достаточно толстого ($\sim 5 - 10$ мкм) защитного слоя из чистого SiO_2 между кольцом и материалом опорной кварцевой трубки, чтобы исключить возможное влияние повышенного содержания гидроксильных групп OH^- на потери в кольцевом световоде. На рис.5 показан типичный про-

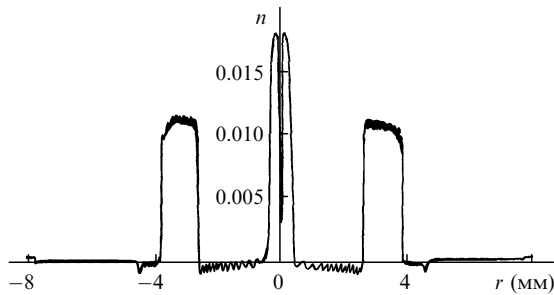


Рис.5. Типичный вид профиля показателя преломления в заготовке двухканального концентрического световода.

филь показателя преломления в заготовке световода № 801 с разностями показателей преломления в одномодовой сердцевине $\Delta n_c = 0.018$ и в кольцевом световоде $\Delta n_r = 0.011$.

При перетяжке заготовки в световод диаметр одномодовой сердцевины составлял 4–5 мкм, а внутренний и внешний диаметры кольца – соответственно 40 и 60 мкм. Внешний диаметр световодов был равен 125 мкм. Принимая во внимание результаты численных расчетов, мы старались у всех световодов делать кольца одинаковых (стандартных) размеров – 40/60 мкм. Это обеспечивает возможность стыковки световодов друг с другом и облегчает анализ оптических потерь при варьировании главных технологических параметров концентрической структуры – разности показателей преломления в одномодовой сердцевине Δn_c и в кольце Δn_r относительно материала оболочки из SiO_2 .

Задав геометрические размеры, мы варьировали только один технологический параметр – разность показателей преломления для кольцевого световода Δn_r в пределах 0.008–0.014, а соответствующую разность для одномодовой сердцевины Δn_c поддерживали на уровне 0.018 ± 0.002 . Этим мы создавали неравенство постоянных распространения для мод кольца и одномодовой сердцевины и обеспечивали подавление возможных эффектов распределенной связи между одномодовой сердцевиной и кольцом.

По описанной технологии было изготовлено более 100 км световодов. В качестве вторичных покрытий при вытяжке применялись акрилат или эластичные силиконовая резина и лак.

4. Зависимость потерь от параметров профиля и изгибов световодов

В изготовленных световодах сердцевина представляет собой практически обычный одномодовый световод с длиной волны отсечки около 1.25 мкм и малыми оптическими потерями $\alpha_c \leq 1$ дБ/км (см. табл.1). Использование большого скачка $\Delta n_c = 0.018$ в одномодовой сердцевине привело к некоторому увеличению затухания вследствие рэлеевского рассеяния и к меньшей чувствительности потерь к изгибам и микроизгибам. Концентрация поля моды HE_{11} около оси световода должна благотворно сказаться на уровне перекрестных помех между сердцевиной и кольцом. Других особенностей одномодового световода в концентрической геометрии нет. Возможное влияние особенностей технологии изготовления на потери в одномодовой сердцевине мы рассмотрим в связи с экспериментами по обратному рэлеевскому рассеянию.

С точки зрения волноводных свойств кольцевой световод представляет собой особый световод, в котором оптическая ось не является осью максимальной концентрации энергии каналируемых световых волн, как это имеет место в случае HE_{11} -моды обычных световодов. В нем отсутствует перенос света HE_{11} -модой вдоль геометрической оси, и он скорее представляет собой плоский многомодовый световод толщиной ~ 10 мкм, свернутый в световедущую трубку. Вследствие этого следует ожидать повышенной чувствительности кольцевого световода к таким нерегулярностям, как изгибы и микроизгибы.

Следует отметить, что применительно к световодам с кольцевой геометрией волноводная теория не дает ответа на вопрос о минимальных достижимых оптических потерях в такой структуре, а также не позволяет (из-за сложности теоретического анализа) описать зависимость потерь от изгибов и микроизгибов. Здесь мы имеем случай, когда именно экспериментальные данные должны ответить на поставленные вопросы, указать на порядок эффектов и дать значения параметров для расчетов. Важно, чтобы эксперименты были проведены при соответствующих условиях.

Прежде всего мы измерили потери в кольцевом сердечнике α_r на длине волны 1.3 мкм у всех изготовленных нами световодов. В ходе вытяжки световоды наматывались на технологические барабаны радиусом $R = 16$ см, а затем перематывались на исследовательские катушки радиусами 8 и 10 см при натяжениях $F_t \sim 50 - 100$ г, испытывающих волокно на прочность. Как уже отмечалось, технологически варьировемым параметром у световодов была разность показателей преломления для кольца Δn_r , однако в ходе перемотки на катушки появились еще два переменных параметра – радиус намотки R и сила натяжения F_t . Кроме того, влияние натяжения на потери зависело от того, производится ли намотка «внавал» или световоды укладываются регулярно, послойно, с мягкой бумажной прокладкой между слоями.

На рис.6 приведены некоторые экспериментальные данные (точки) на зависимости потерь в кольце α_r от радиуса намотки R . Здесь своего рода параметрами являются Δn_r и F_t . Видно, что при намотке как на технологические барабаны с $R = 16$ см, так и на исследовательские

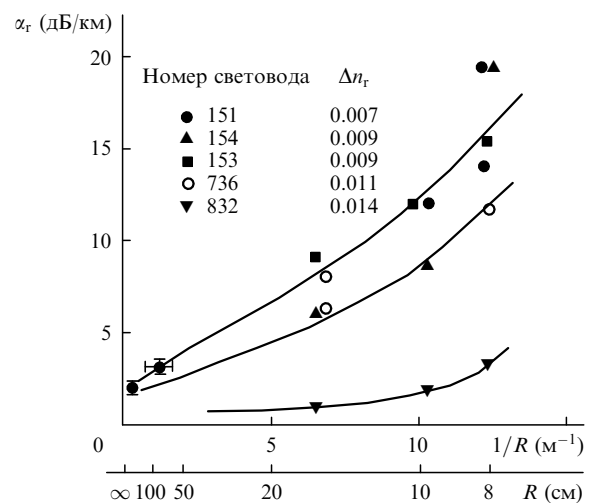


Рис.6. Экспериментальные зависимости оптических потерь в кольцевом световоде α_r (точки) на длине волны 1.3 мкм от радиуса намотки R при неконтролируемом (ненулевом) натяжении.

катушки с $R = 8$ и 10 см, потери α_r сильно зависят от Δn_r и F_t . Наибольшие потери $\alpha_r = 10 - 20$ дБ/км на катушках имеют световоды с малыми $\Delta n_r = 0.007 - 0.009$ при натяжении $F_t = 50 - 100$ г. Ясно, что в случае практического использования столь высокие потери в кольце неприемлемы, а разброс точек свидетельствует о неоднозначности экспериментальных данных, затрудняющей проведение анализа с целью достижения минимальных потерь. Отметим, что оптическое качество исходных материалов было достаточно высоким, о чем свидетельствуют сравнительно небольшие ($\alpha_c < 1$ дБ/км) оптические потери в одномодовой сердцевине, которая изготавливалась в едином технологическом цикле с кольцевым световодом. Данные рис.6 свидетельствуют о сильном влиянии изгибов и микроизгибов на величину оптических потерь в кольцевом световоде.

Самый чувствительный к изгибам световод № 151 длиной 1 км был подвергнут перемотке на катушку радиусом $R = 1$ м при малом натяжении $F_t \sim 10$ г, а также сматыванию и распрямлению в лабораторных условиях ($R \approx \infty$). В обоих случаях было обнаружено резкое уменьшение потерь в кольце до $\alpha_r \approx 2 - 3$ дБ/км (рис.6), что подтверждает предположение о радикальной зависимости потерь в кольце от изгибов и микроизгибов. Для световода № 832 с $\Delta n_r = 0.014$ было обнаружено, что при перемотке на барабан радиусом $R = 16$ см с малым натяжением $F_t = 10$ г оптические потери в кольце составили 1 дБ/км, что примерно совпадает с потерями в одномодовой сердцевине. При перемотке этого световода на исследовательские катушки радиусом 8 см потери в кольце возрастали до 2–3 дБ/км.

Совокупность приведенных на рис.6 данных показывает, что потери в кольце могут быть столь же малыми, как и в одномодовой сердцевине (~ 1 дБ/км). Учитывая это, мы исследовали зависимость потерь в кольце α_r от Δn_r во всех изготовленных нами световодах с существенно различающимися Δn_r . Для однозначности результатов, что очень важно в данном случае, все световоды были перемотаны на катушки радиусом $R = 16$ см при минимальном натяжении ($F_t < 5$ г). Между слоями световодов на катушках прокладывалась тонкая мягкая бумага. Результаты измерений приведены на рис.7. Видно, что график зависимости $\alpha_r(\Delta n_r)$ демонстрирует практически линейное уменьшение потерь на изгибах при увеличении Δn_r вплоть до 0.0140 ± 0.0005 . При $\Delta n_r = 0.014$ потери в кольцевом световоде достигают минимальных

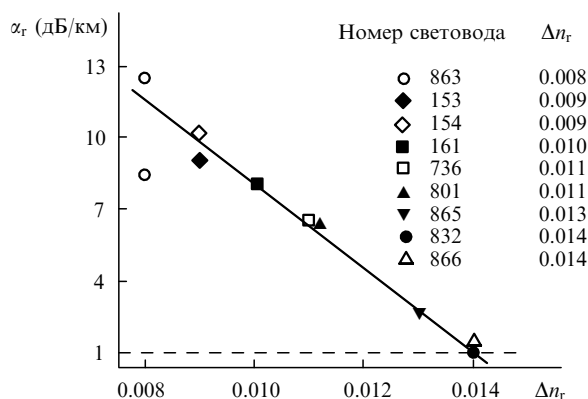


Рис.7. Экспериментальная зависимость оптических потерь в кольце α_r от разности показателя преломления в кольце Δn_r при $R = 16$ см и $F_t < 5$ г.

Табл.1. Основные параметры концентрических двухканальных световодов, намотанных с малым натяжением ($F_t < 5$ г) на барабан радиусом $R = 16$ см. Измерения затухания α_c , α_r и переходных помех α_{cr} , α_{rc} выполнены на длине волны 1.3 мкм.

Номер световода	Длина (м)	$\Delta n_c/\Delta n_r$	Оптические потери (дБ/км)		Переходное затухание (дБ)	
			α_c	α_r	α_{cr}	α_{rc}
801	3840	0.018/0.011	0.90	6.9	-42	-52
832	3100	0.016/0.014	0.94	1.0	-45	-55
865	4760	0.020/0.013	0.70	1.6	-48	-58
866	4140	0.016/0.014	0.81	1.4	-49	-57

Примечание. Погрешность при измерениях переходного затухания α_{cr} и α_{rc} составляет 10 %.

значений ($\alpha_r = 1$ дБ/км), характерных для потерь, обусловленных оптическим качеством материала сердцевин. В распрямленном состоянии малые потери в кольце могут иметь световоды и с $\Delta n_r = 0.010 - 0.013$. Основные параметры концентрических световодов приведены в табл.1 и включают данные по световодам № 832, 865 и 866, на которых были получены лучшие результаты по затуханию в кольце.

5. Переходное затухание в двухканальных концентрических световодах

Оптическая развязка каналов является одним из основных параметров двухканальных световодов. Из теоретического анализа, проведенного выше, следует, что в двухканальных концентрических световодах рассматриваемой геометрии можно ожидать высокую оптическую развязку между каналами (свыше 50 дБ). Это выдвигает одно весьма жесткое требование к измерениям переходных потерь α_{cr} и α_{rc} , а именно: при возбуждении одномодовой сердцевин или кольца уровень возбуждения другого канала должен быть на 60–70 дБ ниже по оптической мощности, что обуславливает особые требования к устройствам и методам отдельного возбуждения каналов.

Очевидно, что для возбуждения одномодовой сердцевин следует использовать одномодовый световод с точно таким же профилем показателя преломления; при этом сердцевина должна быть идеально отъюстирована в радиальном направлении. Уровень потерь при стыковке (сращивании) ~ 0.01 дБ, обычно считающийся хорошим при сращивании одномодовых световодов, в данном случае полностью неприемлем, т.к. уже на входе при возбуждении мы можем получить оптическую помеху на уровне -20 дБ. Отметим, что в работах [2, 6], где измерялись перекрестные помехи между каналами двухканальных световодов, экспериментальные данные по переходному затуханию обычно составляли не менее $-20 \div -30$ дБ, поэтому в настоящей работе для надежного измерения параметров переходного затухания α_{cr} и α_{rc} мы использовали схемы возбуждения и измерения, показанные на рис.8.

Для измерения переходного затухания из одномодовой сердцевин в кольцо α_{cr} мы на входном конце световода удалили кольцо на длине ~ 0.3 м путем стравливания, оставив одномодовую сердцевину для обеспечения возбуждения только одномодового сердечника (рис.8,а). Удалив вытекающие и оболочечные моды, мы обеспечили уровень оптической развязки при возбужде-

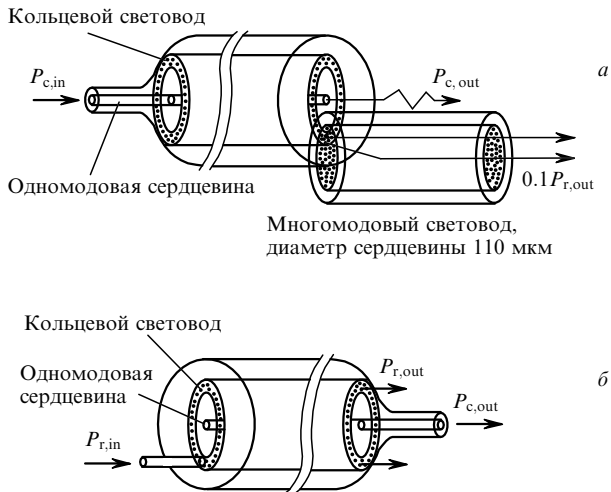


Рис.8. Схема возбуждения одномодовой сердцевины и измерения переходного затухания из одномодовой сердцевины в кольцевой световод α_{cr} (а) и схема возбуждения кольцевого световода и измерения переходного затухания из кольца в одномодовую сердцевину α_{rc} (б).

нии одномодовой сердцевины на входе по отношению к кольцевому световоду не менее 70 дБ.

Для измерения мощности оптического сигнала на выходе из кольца $P_{r,out}$ нами использовался вспомогательный отрезок многомодового световода длиной ~ 1 м с диаметрами сердцевины 110 мкм и оболочки 125 мкм, который на выходном торце был смещен от оптической оси двухканального световода так, чтобы из кольца отводилась только 1/10 часть выходной мощности $P_{r,out}$; при этом он был полностью оптически развязан с одномодовым сердечником. В то же время при юстировке этого многомодового световода соосно с двухканальным световодом с его помощью измерялась оптическая мощность $P_{c,out}$, выходящая из одномодового канала. Переходное затухание из одномодовой сердцевины в кольцо определялось по формуле $\alpha_{cr} = 10 \lg(P_{r,out}/P_{c,out})$. Измеренные значения α_{cr} для исследованных световодов приведены в табл.1.

Мы обнаружили, что для исследованных световодов существует установившийся режим для уровня перекрестных потерь α_{cr} , который стабилизируется при длинах световодов, превышающих 0.5 км. Стационарные значения параметра α_{cr} для каждого световода являются его характеристикой и свидетельствуют о динамически равновесном распределении энергии по волноводным модам в обоих каналах и о достаточно высокой оптической развязке между каналами, превышающей 40 дБ. Полученные значения параметров $\alpha_{cr} = -40 \dots -50$ дБ зависят от условий намотки и от натяжения при намотке на катушки. В наших экспериментах переходное затухание α_{cr} было измерено по описанной методике у всех световодов при намотке на катушки радиусом $R = 16$ см и малом натяжении $F_t < 5$ г.

Оптическая схема измерения переходного затухания α_{rc} из кольца в одномодовую сердцевину приведена на рис.8,б. Возбуждение кольца проводилось с помощью вспомогательного отрезка одномодового на длину волны 1.3 мкм световода с диаметром сердцевины 7 мкм. Оптическая мощность на выходе из одномодовой сердцевины $P_{c,out}$ измерялась также при стравливании кольца

и выведении оболочечных и вытекающих мод. Эксперименты показали, что мощность $P_{c,out}$ может быть измерена с погрешностью около 10 % с помощью подобранного отрезка одномодового световода с тонкой оболочкой (чтобы не захватывать излучение с выхода кольца). Мощность излучения на выходе кольцевого световода $P_{r,out}$ измерялась отрезком многомодового световода с диаметром сердцевины 110 мкм, пристыкованного соосно к выходу двухканального кольцевого световода. Переходное затухание из кольца в одномодовую сердцевину определялось по формуле $\alpha_{rc} = 10 \lg(P_{c,out}/P_{r,out})$. Полученные значения α_{rc} лежат в диапазоне $-50 \div -60$ дБ (см. табл.1) и свидетельствуют о высокой оптической развязке каналов.

Переходное затухание α_{rc} примерно на порядок превышает α_{cr} . Это указывают на то, что в намотанных на катушку световодах поле моды HE_{11} одномодового световода, вытекающее при изгибах, частично улавливается кольцевым многомодовым световодом. Обратная перекачка излучения из многомодового кольцевого световода в одномодовую сердцевину затруднена из-за существенно различной структуры полей световодных мод кольца и одномодового световода. Вследствие значительного различия показателей преломления в сердцевине и кольце постоянные распространения световодных мод также различаются, и мы не наблюдаем сколь угодно заметного влияния распределенной связи между каналами, которая могла бы существенно уменьшить переходное затухание между ними.

6. OTDR-эксперименты и распределение затухания по волоконной линии длиной 12 км на двухканальных концентрических световодах

Для дополнительного подтверждения отсутствия распределенной связи между каналами при больших длинах световодной линии, а также для проверки эффективности сращивания концентрических двухканальных световодов мы провели эксперименты по исследованию сигналов обратного рэлеевского рассеяния и распределения оптических потерь по длине световодной линии. Для этого из световодов № 832, 865 и 866 была построена волоконная линия длиной 12 км. Благодаря стандартизации геометрических размеров двухканальных концентрических световодов их сращивание, вызывающее малые оптические потери, производилось с помощью механических сплайсеров типа US-126SM, предназначенных для сращивания обычных одномодовых световодов с внешним диаметром 125 мкм.

Для получения сигналов обратного рэлеевского рассеяния из одномодовой сердцевины мы использовали серийный рефлектометр типа MW910C (Anritsu) на рабочей длине волны 1.31 мкм. На рис.9,а приведена запись сигнала OTDR из одномодовой сердцевины для волоконной линии длиной 12 км. Заметны две ступеньки – сращения световодов с потерями около 1 дБ. Среднее затухание на участке длиной 10 км, выделенном маркерами на рис.9,а, составило 1 дБ/км. Увеличенные потери в местах сращиваний связаны с тем, что профили показателя преломления для одномодовой сердцевины и значения Δn_c в стыкуемых отрезках несколько различались (см. табл.1). Кроме того, внешний диаметр световодов (125 мкм) выдерживался с погрешностью ± 1 мкм, что

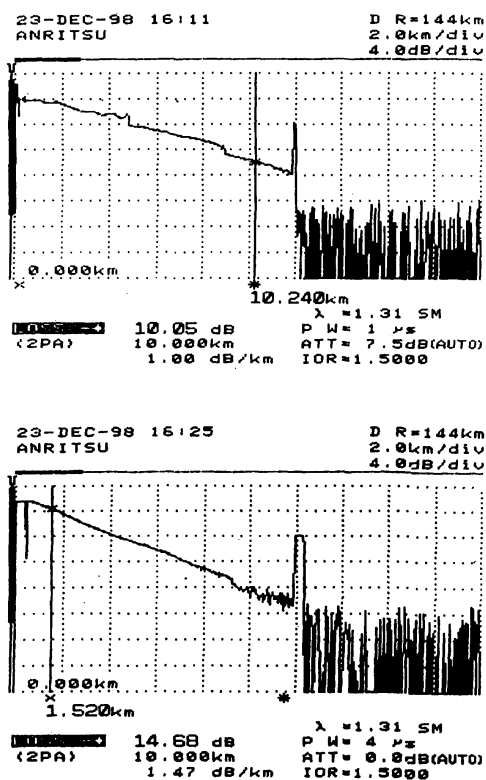


Рис.9. Распределение сигналов обратного рассеяния (OTDR) в волоконной линии на двухканальных концентрических световодах длиной 12 км для одномодовой сердцевин (а) и кольцевого световода (б) при среднем затухании по одномодовой сердцевине 1 дБ/км, по кольцевому световоду – 1.47 дБ/км.

также сказались на радиальном рассогласовании одномодовых сердечников и на потерях в местах сращения. Первый участок в волоконной линии на световоде № 865 имел увеличенное значение $\Delta n_c \approx 0.020$. Заметны небольшие вариации сигнала OTDR по длине этого световода, связанные с флуктуациями содержания GeO_2 в сердцевине и с некоторыми вариациями ее диаметра. В целом же картина сигнала OTDR с учетом указанных технологических особенностей одномодовой сердцевин является достаточно регулярной. Эти данные также свидетельствуют об отсутствии распределенной связи между одномодовым и кольцевым каналами, которая на длине 12 км могла бы привести к сильному перераспределению мощности между ними.

Используя отдельный трехкоординатный столик, мы возбудили одномодовым световодом, выходящим из рефлектометра MW910С, торец кольцевого световода. При этом из-за значительных потерь на вывод сигнала обратного рассеяния было потеряно около 10 дБ из динамического диапазона рефлектометра, однако уверенно наблюдался сигнал OTDR из кольцевого световода на протяжении всех 12 км (см. рис.9,б). Видно, что кольцевые световоды состыкованы значительно лучше одномодовых и что потери на сращениях не превышают 0.3 дБ. Это связано с тем, что разброс внешнего диаметра световодов ± 1 мкм слабее сказался на перекрытии площадей в сечении кольцевых сердечников.

Регулярный ход зависимости сигнала OTDR по всей длине 12 км также свидетельствует об отсутствии распределенной связи между каналами. Среднее затухание в линии по кольцевому световоду составляет 1.47 дБ/км.

7. Заключение

Таким образом, на основе теоретического анализа и экспериментальных исследований разработаны новые двухканальные концентрические световоды с широкополосным одномодовым световодным каналом и дополнительным кольцевым многомодовым световодом, предназначенные для двухканальной и дуплексной связи, а также для ряда специальных применений. Исследовано влияние регулярных изгибов и микроизгибов на затухание в кольце, определена оптимизированная конструкция, найдены параметры двухканальных световодов с потерями в одномодовом световоде не более 1 дБ/км, а также потери в кольцевом сердечнике не более 1.5 дБ/км при намотке световода на катушки и не более 1 дБ/км в распрямленном состоянии. Показано, что в световодах с оптимизированными параметрами профиля показателя преломления достигается уровень оптической развязки между каналами свыше 40 дБ, что открывает возможности для многих специальных и уникальных применений разработанных световодов.

По одномодовому световодному каналу когерентное лазерное излучение может передаваться одновременно с излучением, распространяющимся по кольцевому световоду, независимо от него. На основе разработанных световодов могут строиться многофункциональные волоконно-оптические датчики интерферометрического типа и амплитудные датчики, использующие некогерентные световые потоки по кольцевому световоду. Внешний диаметр (125 мкм) разработанных световодов совпадает с диаметром обычных связных световодов, и поэтому двухканальные световоды могут сращиваться в длинные линии с использованием стандартных технологических приемов и установок. Для раздельного и независимого возбуждения одномодового и кольцевого световодов необходима разработка специальных волоконных устройств ввода/вывода – направленных ответвителей с соответствующими параметрами и потерями. Это представляет собой самостоятельную технологическую задачу и является предметом отдельного исследования.

Авторы выражают благодарность Н.Н.Вечканову, А.Г.Щебуняеву, А.Ю.Андрееву и А.К.Михайлову за помощь в проведении экспериментов на различных этапах работы. Работа частично поддержана грантом РФФИ № 00-15-96650.

1. Bender A., Salisbury G., Akers F., Christian R., Steensma P. *Techn.Digest of Topical Meeting on OFC* (Washington, 1979, paper ThC4, pp.102-104).
2. Беланов А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **6**, 2646 (1979).
3. Грудинин А.Б., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М., Игнатьев С.В., Мирошниченко С.И. *Квантовая электроника*, **11**, 73 (1984).
4. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. *Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения* (М., Энергоатомиздат, 1990, с.197-229).
5. Маркузе Д. *Оптические волноводы* (М., Мир, 1974).
6. Unger H.-G. *Planar optical waveguides and fibers* (Oxford, Clarendon, 1977).
7. Беланов А.С., Дианов Е.М., Кривенков В.И. *ДАН*, **364**, № 1, 37 (1999).
8. Belanov A.S., Ezov G.I., Tschernij W.W. *Wellenausbreitung in runden Leitungen aus geschichteten Dielektrika*. AEU, Bd. 27, 11, s.494-496 (1973).