

# Оптические потери в одномодовых и многомодовых световодах с высокой концентрацией $\text{GeO}_2$ и $\text{P}_2\text{O}_5$

М.Е.Лихачев, М.М.Бубнов, С.Л.Семенов, В.Ф.Хопин,  
М.Ю.Салганский, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов

*Исследованы оптические потери в одномодовых и многомодовых волоконных световодах, легированных оксидом германия и оксидом фосфора до высоких концентраций. Обнаружено, что оптические потери в многомодовых световодах в широком спектральном диапазоне значительно меньше, чем оптические потери в одномодовых световодах с той же концентрацией легирующей примеси. Исследования маломодовых световодов показали, что область границы сердцевина–оболочка является областью повышенных оптических потерь. Обсуждаются причины наблюдаемого соотношения оптических потерь в одномодовых и многомодовых световодах.*

**Ключевые слова:** волоконная оптика, высоколегированные световоды, оптические потери.

## 1. Введение

Хорошо известно, что в одномодовых волоконных световодах, изготовленных методом химического осаждения из газовой фазы (MCVD) и легированных оксидом германия до молярных концентраций 15 % – 30 %, наблюдаются высокие избыточные оптические потери [1–4], значительно превышающие оценочный уровень фундаментальных потерь (рэлеевское рассеяние, электронное и фононное поглощение) и быстро растущие с повышением концентрации легирующей добавки. Несмотря на многочисленные попытки установить причины резкого роста оптических потерь [1, 2, 5–11], в настоящее время нет удовлетворительного объяснения наблюдаемого явления. Также нет ясности в том, какие области в световоде являются источником высоких оптических потерь. В ряде исследований предполагается, что оптические потери растут в сердцевине световода [2–4, 10–12], в то время как в других работах рассматриваются механизмы возникновения оптических потерь на границе сердцевина–оболочка [5–9].

Многомодовые высоколегированные световоды не нашли широкого применения в линиях связи и вследствие этого исследовались мало. В то же время сравнительный анализ оптических потерь в многомодовых и одномодовых световодах, а также исследование маломодовых световодов может пролить свет на механизмы избыточных потерь в высоколегированных световодах. Данная работа посвящена изучению избыточных потерь в световодах с высокой концентрацией оксида германия либо оксида фосфора. Обнаружено, что зависимость оптических потерь от концентрации легирующей добавки и температуры вытяжки в многомодовых световодах прин-

ципально отличается от таковой в одномодовых световодах. Исследованы оптические потери в маломодовых световодах на границе сердцевина–оболочка.

## 2. Изготовление экспериментальных образцов

Заготовки для исследуемых световодов изготавливались методом MCVD. В качестве опорных использовались трубы из высокочистого кварцевого стекла. Изготавливалось два типа заготовок – легированные оксидом германия либо оксидом фосфора. Отражающая оболочка изготавливалась из кварцевого стекла, легированного  $\text{P}_2\text{O}_5$  (молярная концентрация 1 % – 2 %) и F (атомарная концентрация 0.1 % – 0.3 %). Сердцевина германосиликатных световодов состояла из F– $\text{GeO}_2$ – $\text{SiO}_2$ , фосфоросиликатных световодов – из  $\text{P}_2\text{O}_5$ – $\text{SiO}_2$ . Многомодовые и одномодовые световоды вытягивались из одной заготовки. Часть исходной заготовки вставлялась в трубку из кварцевого стекла и схлопывалась с ней, а затем получившаяся заготовка перетягивалась в одномодовый световод. Из оставшейся части исходной заготовки вытягивался многомодовый световод. Полученные таким образом одномодовые и многомодовые световоды обладали одинаковой концентрацией легирующей примеси, одинаковой формой профиля показателя преломления (ППП) и одинаковым внешним диаметром (125 мкм). В некоторых заготовках этап схлопывания был модифицирован так, чтобы практически полностью устранить центральный провал в PPP заготовки.

## 3. Оптические потери в одномодовых и многомодовых световодах

### 3.1. Зависимость потерь от уровня легирования

Наши исследования показали, что при небольших молярных концентрациях оксида германия (менее 5% – 7%) оптические потери в многомодовых световодах в широком спектральном диапазоне больше оптических потерь в одномодовых световодах. Это обстоятельство вполне ожидаемо. Уровень оптических потерь в стекле, легированном оксидом германия, выше, чем в чисто кварцевом

М.Е.Лихачев, М.М.Бубнов, С.Л.Семенов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул.Вавилова, 38  
В.Ф.Хопин, М.Ю.Салганский, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ул.Тропинина, 49

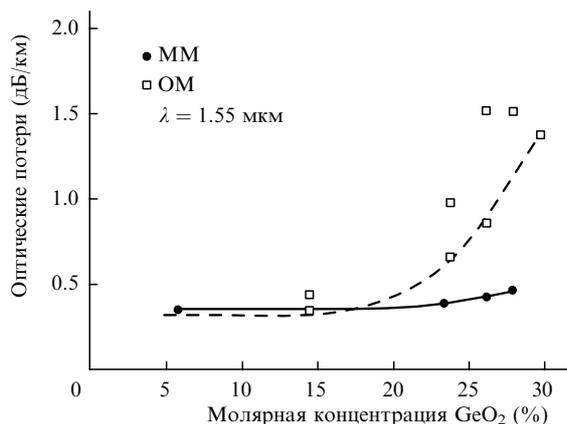


Рис.1. Оптические потери в многомодовых (ММ) и одномодовых (ОМ) световодах с различным ППП, легированных оксидом германия.

стекле [13]. Оптические потери в слаболегированном кварцевом стекле, из которого сделана отражающая оболочка, сравнимы с таковыми в чисто кварцевом стекле или даже меньше их [14]. Доля мощности излучения, распространяющегося по сердцевине, больше в многомодовых световодах, поэтому и оптические потери за счет фундаментальных механизмов в них больше.

В кварцевом стекле, легированном оксидом фосфора при молярной концентрации выше 6%, коэффициент рэлеевского рассеяния близок к таковому в чисто кварцевом стекле [14]. Поэтому можно ожидать, что в многомодовых световодах, легированных  $\text{P}_2\text{O}_5$ , оптические потери будут сравнимы с оптическими потерями в одномодовых световодах.

Однако проведенные исследования показали, что при высоких концентрациях легирующей добавки соотношение оптических потерь в одномодовых и многомодовых световодах отличается от предполагаемого. На рис.1 представлены оптические потери в световодах, легированных оксидом германия с молярной концентрацией 5%–30%. Видно, что при концентрациях  $\text{GeO}_2$  более 20% оптические потери в многомодовых MCVD-световодах значительно ниже, чем в одномодовых световодах при том же уровне легирования. Наблюдаемое соотношение оптических потерь не зависит от формы ППП и температуры вытяжки световодов. Такая же ситуация в широком спектральном диапазоне (0.6–1.5 мкм) наблюдается и в образцах, легированных  $\text{P}_2\text{O}_5$  до высоких (более 10%) молярных концентраций [15].

### 3.2. Зависимость оптических потерь от температуры

Хорошо известно, что оптические потери в одномодовых высоколегированных световодах зависят от температуры вытяжки [1, 16]. Мы исследовали ряд одно- и многомодовых высоколегированных световодов, различающихся формой ППП (ступенчатый или градиентный ППП), существует или отсутствует центральный провал в ППП) и легирующей добавкой (оксид германия или оксид фосфора). Установлено, что в многомодовых световодах зависимость потерь от температуры вытяжки на порядок слабее, чем в одномодовых, либо отсутствует вовсе. Спектральные распределения оптических потерь в сильнолегированных (с молярной концентрацией  $\text{GeO}_2$ , составляющей 26%) одномодовых и многомодовых световодах, вытянутых из одной заготовки при различных температурах, представлены на рис.2.

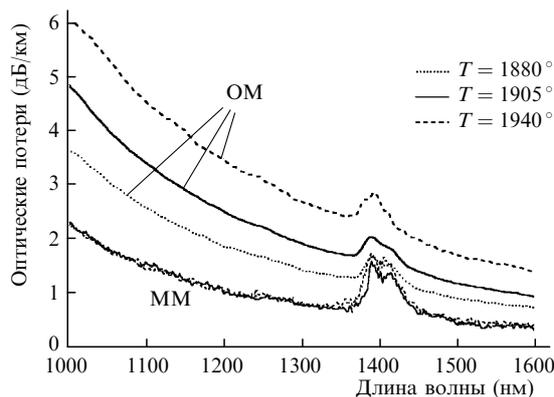


Рис.2. Зависимости спектров оптических потерь от температуры вытяжки в ОМ и ММ световодах с молярной концентрацией оксида германия 26%.

### 3.3. Полосы поглощения в многомодовых и одномодовых световодах

Если рост оптических потерь связан с ростом потерь в материале сердцевины, то затухание сигнала в многомодовом световоде должно быть больше, чем в одномодовом, поскольку в многомодовых световодах значительно большая доля мощности света идет по сердцевине.

В фосфоросиликатном стекле ИК поглощение больше, чем в чисто кварцевом. Это обусловлено появлением дополнительных полос фонного поглощения в ИК области за счет изменения сетки стекла [14, 17]. Кроме того, в фосфоросиликатных световодах присутствует пик поглощения ОН-групп в районе 1.55 мкм [18]. Оба механизма обуславливают рост поглощения в сердцевине высоколегированных фосфорных световодов и приводят к тому, что в спектральной области с  $\lambda > 1.5$  мкм оптические потери в многомодовом световоде выше, чем в одномодовом (рис.3).

В то же время пик поглощения в районе 1.4 мкм в многомодовом световоде ниже. Данный пик обусловлен присутствием ОН-групп в кварцевом стекле, и его интенсивность уменьшается при введении оксида фосфора в сетку стекла за счет изменения частоты колебаний некоторых связей Si–ОН [18]. Доля мощности излучения, распространяющегося по оболочке, больше в случае одномодового световода, поэтому интенсивность пика поглощения в многомодовом световоде должна быть меньше, чем в одномодовом, что мы и видим на рис.3.

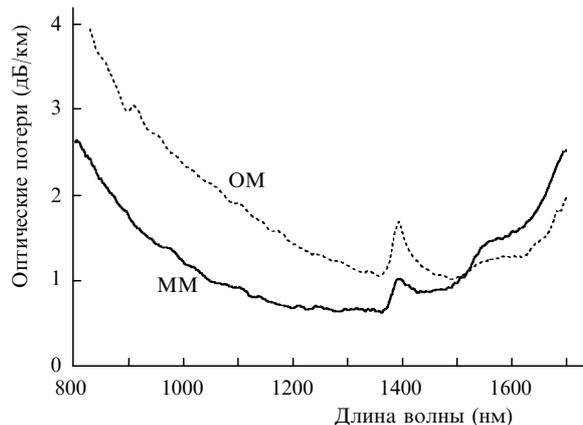


Рис.3. Спектры оптических потерь в ОМ и ММ световодах, легированных оксидом фосфора до молярной концентрации 10%.

## 4. Исследование маломодовых световодов

### 4.1. Описание методики

В ряде работ, посвященных исследованию механизмов оптических потерь в высоколегированных световодах [5–9, 19–21], предполагалось, что в одномодовых световодах областью повышенных потерь является граница сердцевина – оболочка. Для проверки этого предположения было проведено исследование маломодовых световодов. Заметим, что источником оптических потерь может являться и область центрального провала в ППП [22]. Поэтому, для установления влияния на оптические потери только границы сердцевина – оболочка, на стадии изготовления световодов осуществлялась дополнительная технологическая операция, обеспечивающая практически полное устранение центрального провала в ППП. Изучаемые световоды, высоколегированные оксидом германия либо оксидом фосфора, имели длину волны отсечки второй моды в диапазоне 0.98–1.1 мкм. Исследование световодов проводилось с помощью гелий-неонового лазера на  $\lambda = 0.63$  мкм.

На данной длине волны в световодах могут распространяться до четырех групп мод с разными наборами угловых ( $l$ ) и радиальных ( $m$ ) индексов:  $m = 1, l = 0, 1, 2$  (рис.4,а) и  $m = 2, l = 0$ . Мода LP<sub>02</sub>(HE<sub>12</sub>) с  $l = 0$  и  $m = 2$  имеет длину волны отсечки вблизи 632.8 нм и легко выводится из световода скремблером; в нашей работе она не исследовалась. Моды с одинаковыми индексами имеют одинаковое распределение амплитуды электрического поля по радиусу и одинаковые постоянные распространения. Варьируя условия возбуждения света в волоконном световоде, нам удавалось возбуждать только один набор мод с индексами  $l = 0, 1, 2$  и  $m = 1$  (рис.4,б). Для каждой из возбужденных мод методом последовательно-

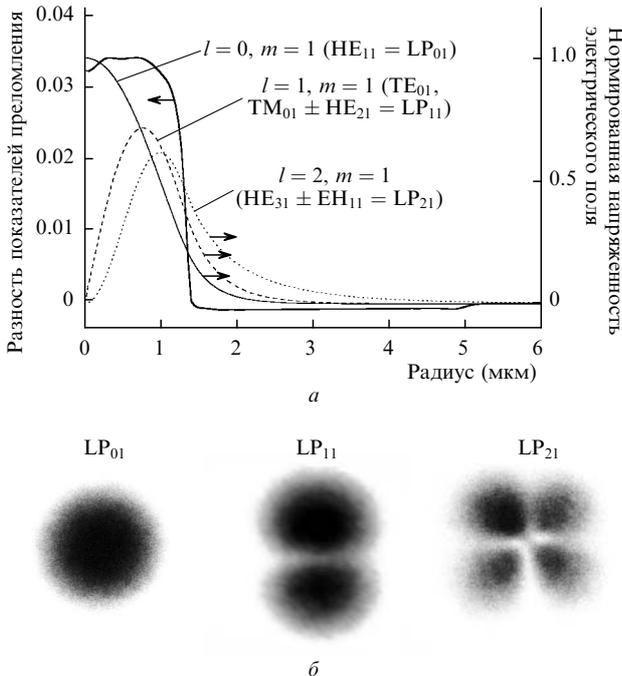


Рис.4. Радиальное распределение электрического поля для мод с  $l = 0, 1$  или  $2$  и  $m = 1$  на длине волны 632.8 нм, а также профиля показателя преломления в световоде Ge303 (23.5% GeO<sub>2</sub>) при поле, нормированном на одинаковую распространяющуюся мощность во всех модах (а), и фотографии в дальнем поле введенных в световод мод (б).

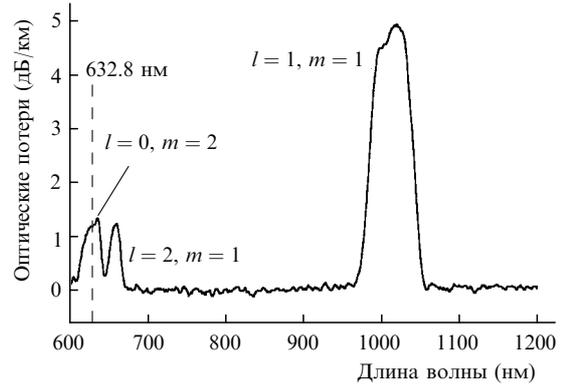


Рис.5. Измеренные длины волн отсечки второй ( $l = 1, m = 1$ ), третьей ( $l = 2, m = 1$ ) и четвертой ( $l = 0, m = 2$ ) мод в световоде Ge303.

го уменьшения длины световода измерялись оптические потери.

При распространении по световоду моды с одинаковыми индексами  $l$  и  $m$  легко перемешивались даже в отрезках световода длиной несколько метров, тогда как связь между модами с разными индексами была незначительной вследствие большой разности постоянных распространения. Так, при возбуждении в световоде, легированном оксидом фосфора ( $\Delta n = 0.01$ ), одной из двух групп мод ( $m = 1, l = 1$  или  $2$ ), которые могут распространяться на длине волны 632.8 нм, на выходе 500-метрового отрезка световода вторая группа мод визуально не наблюдалась. В высоколегированных германатных световодах при длине световода  $\sim 50$  м возбуждаемая мода испытывала значительное затухание (в 1.5–2 раза), и на выходе наблюдались моды, отличные от тех, которые возбуждались на входе. По всей видимости, это можно объяснить частичным каналированием рассеиваемого излучения из-за большой разности показателей преломления сердцевина и оболочка ( $\Delta n = 0.034$ , рис.4,а). Поэтому длина исследуемых световодов подбиралась таким образом, чтобы потери в них были достаточно велики ( $\sim 1 - 2$  дБ), но при этом не наблюдалось существенного возбуждения мод, отличных от моды, возбужденной на входе световода. Длины волн отсечки исследуемых мод были заметно больше рабочей длины волны (рис.5), что позволяет уверенно говорить об отсутствии вытекания данных мод.

### 4.2. Полученные результаты

На рис.6 показаны оптические потери первых трех мод с радиальным индексом  $m = 1$  и угловыми индексами  $l = 0, 1, 2$  в германосиликатном световоде для двух разных температур вытяжки. Каждое измерение проводилось на четырех различных участках световода (длина отрезка около 25 м), после чего определялись среднее значение оптических потерь для каждой моды и их среднеквадратичный разброс. Профиль показателя преломления данного световода и распределение электрического поля каждой из мод показаны на рис.4,а.

Оптические потери растут с увеличением индекса  $l$ , при этом доля мощности излучения, распространяющегося по сердцевине световода, уменьшается. Это позволяет сделать вывод о том, что значительный вклад в оптические потери дает не только сердцевина. Оптические потери в материале, из которого изготовлена отражающая оболочка, должны быть близки к потерям, характер-

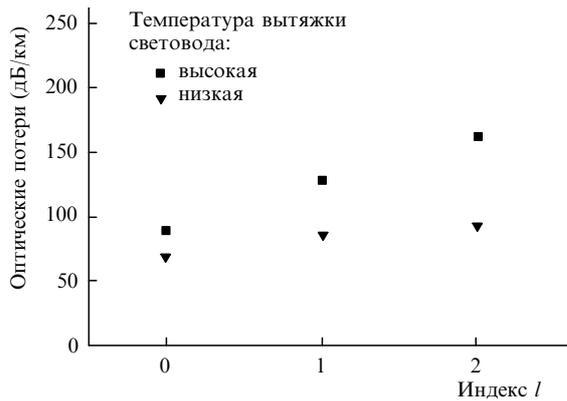


Рис.6. Оптические потери мод с  $m = 1$  в световоде Ge303 при двух температурах вытяжки в зависимости от индекса  $l$ . Длина волны 0.63 мкм.

ным для нелегированного кварцевого стекла [14]. Отсюда следует, что значительная часть оптических потерь в изученных световодах происходит на границе сердцевина – оболочка; это позволяет объяснить рост оптических потерь с увеличением индекса  $l$ . Проведенные нами расчеты показали, что нормированная мощность света в исследуемых модах на границе сердцевина – оболочка больше для мод с большим индексом  $l$ .

Увеличение температуры вытяжки приводит к росту оптических потерь для каждой группы мод, что коррелирует с общим увеличением оптических потерь в одномодовых световодах, причем относительное увеличение оптических потерь больше для групп мод с большим индексом  $l$ .

Аналогичная ситуация наблюдается в световодах, легированных оксидом фосфора с молярной концентрацией 12 % – 13 % и ППП, близким к ступенчатому ( $\Delta n_{max} = 0.0105 - 0.0115$ ). Измерения проводились для первых двух мод. Оптические потери основной моды  $LP_{01}(HE_{11})$  оказались меньше, чем моды  $LP_{11}(HE_{21} \pm TM_{01}, TE_{01})$ , во всех изученных образцах световодов. На длине волны 632.8 нм они составляли 8 дБ/км для моды  $LP_{01}$  и 9.3 дБ/км для моды  $LP_{11}$  в световоде P236 (молярная концентрация  $P_2O_5 - 11\%$ ).

**4.3. Оптические потери в сердцевине световода и на границе сердцевина – оболочка**

Результаты работы [14] позволяют сделать вывод о том, что оптические потери в кварцевом стекле, из которого сделана отражающая оболочка (молярная концентрация  $P_2O_5$  1 % – 2 %, атомарная концентрация F

0.1 % – 0.3 %) близки к потерям в нелегированном кварцевом стекле и на длине волны 632.8 нм составляют ~6 дБ/км. Если считать, что суммарные оптические потери обусловлены потерями в сердцевине световода, потерями на границе сердцевина – оболочка и потерями в отражающей оболочке, то, используя полученные нами результаты, можно оценить средние оптические потери для каждой области в изученных германосиликатных и фосфоросиликатных световодах. Границы области сердцевина – оболочка определяются радиусами световода  $r_1$  и  $r_2$ , для которых  $\Delta n(r_1) = 0.1\Delta n_{max}$  и  $\Delta n(r_2) = 0.9\Delta n_{max}$ . Рассчитанные доли мощности для каждой из мод в сердцевине световода и в области границы сердцевина – оболочка приведены в табл.1. Средние оптические потери в сердцевине  $\alpha_{cor}$  и на границе сердцевина – оболочка  $\alpha_{int}$  подбирались такими, чтобы среднеквадратичная разность измеренных модовых потерь и рассчитанных на основе модели была минимальна. В предпоследнем столбце даны оценочные оптические потери для каждой моды на основе полученных значений  $\alpha_{cor}$  и  $\alpha_{int}$ . Видно, что отличие от измеренных оптических потерь (последний столбец) не превышает 5 % и практически находится в пределах погрешности измерений. Интересно отметить, что оптические потери в сердцевине для германосиликатных световодов, вытянутых при разных температурах, одинаковы, хотя коэффициенты  $\alpha_{cor}$  и  $\alpha_{int}$  определялись для разных световодов независимо.

Несмотря на грубость приведенных оценок, можно утверждать, что оптические потери на границе сердцевина – оболочка в несколько раз выше, чем в сердцевине световода, и что они вносят существенный вклад в оптические потери каждой из исследованных мод. При этом именно потери  $\alpha_{int}$  зависят от температуры вытяжки световода. С погрешностью ~35 % в германосиликатном световоде и 25 % в фосфоросиликатном световоде рассчитанное затухание сигнала в сердцевине совпадает с оценкой оптических потерь за счет фундаментальных механизмов.

**5. Обсуждение результатов**

Описанные выше результаты исследований позволяют предположить, что граница сердцевина – оболочка является источником избыточных оптических потерь, тогда как потери в сердцевине определяются в основном фундаментальными механизмами. Полученные нами в работе [22] результаты позволяют утверждать, что источником оптических потерь может также являться область

Табл.1. Оценка оптических потерь в сердцевине световода  $\alpha_{cor}$  и на границе сердцевина – оболочка  $\alpha_{bd}$ ; оптические потери в оболочке  $\alpha_{clad}$  считаются равными 6 дБ/км,  $\lambda = 632.8$  нм.

| Световод                                   | Температура вытяжки (°C) | Индекс $l (m = 1)$ | Доля мощности в сердцевине $P_{cor} (\%)$ | Доля мощности на границе $P_{int} (\%)$ | $\alpha_{cor}$ (дБ/км) | $\alpha_{int}$ (дБ/км) | $\alpha_{cor}P_{cor} + \alpha_{int}P_{int} + \alpha_{clad}(1 - P_{cor}P_{int})$ | Измеренные оптические потери (дБ/км) |
|--|--------------------------|--------------------|---|---|------------------------|------------------------|---|--------------------------------------|
| Ge303 (23.5 % GeO <sub>2</sub> )           | 1940                     | 0                  | 86  | 7.6                                     | 54 ± 0.6               | 547 ± 40               | 89  | 90 ± 2                               |
|  |                          | 1                  | 66  | 17.9                                    |                        |                        | 135   | 128 ± 2                              |
|  |                          | 2                  | 39  | 24.6                                    |                        |                        | 158   | 162 ± 5                              |
| Ge303 (23.5 % GeO <sub>2</sub> )           | 1860                     | 0                  | 86  | 7.8                                     | 54 ± 1                 | 288 ± 8                | 69  | 69 ± 2                               |
|  |                          | 1                  | 66  | 17.9                                    |                        |                        | 88  | 86 ± 3                               |
|  |                          | 2                  | 39  | 24.6                                    |                        |                        | 94  | 93 ± 5                               |
| P236 (11 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 1905                     | 0                  | 92  | 6                                       | 6.56                   | 28.3                   | 7.85  | 7.85 ± 0.1                           |
|  |                          | 1                  | 79  | 13.3                                    |                        |                        | 9.4   | 9.4 ± 0.1                            |

центрального провала в ППП, типичная для MCVD-световодов. Обе области характеризуются наличием границы раздела слаболегированного (отражающая оболочка или середина центрального провала) и высоколегированного кварцевого стекла, поэтому в них могут возникать дефекты сетки стекла [9, 23], флуктуации положения и формы границы вследствие различия вязкостей [24, 25] либо деформации, обусловленные различием коэффициентов термического расширения стекол. Первый механизм может приводить к дополнительному поглощению света на границе сердцевина–оболочка и в области центрального провала в ППП. Второй и третий механизмы приведут к дополнительному рассеянию света. Действительно, исследование угловой зависимости света, рассеянного высоколегированными одномодовыми световодами, выявили присутствие аномального (малоуглового) рассеяния, интенсивность которого значительна только при малых углах и намного превышает интенсивность рэлеевского рассеяния [6, 8, 11, 19]. По нашим оценкам [19], такое рассеяние может вносить значительный вклад в полные оптические потери.

Используя полученные результаты, можно объяснить наблюдаемое соотношение оптических потерь в многомодовых и одномодовых световодах. При небольших концентрациях легирующей добавки (оксид германия) оптические потери определяются в основном фундаментальными механизмами, вклад которых больше в легированном стекле сердцевина. Поэтому в одномодовых световодах оптические потери оказываются меньше либо сравнимыми с потерями в многомодовых световодах. При высоких концентрациях легирующей добавки (оксид германия или оксид фосфора) основной вклад в оптические потери одномодовых световодов вносят механизмы, отличные от фундаментальных. Источником оптических потерь в данном случае является граница сердцевина–оболочка (см. разд. 4). В многомодовых световодах вклад этой области в оптические потери меньше, чем в одномодовых, по следующим причинам:

– При равномерном распределении мощности по всем модам доля полной мощности, распространяющаяся в области границы сердцевина–оболочка, слабо зависит от числа распространяющихся мод и сравнима с долей мощности на этой границе в одномодовых световодах [26]. Однако учет повышенного уровня потерь на границе сердцевина–оболочка у многомодовых световодов и вклада межмодовой конверсии [27] показывает, что при установившемся распределении мощности между модами доля мощности, приходящаяся на моды с большим обобщенным модовым числом  $q = 2m + l$ , невелика. В основном именно эти моды осуществляют перенос мощности в области границы сердцевина–оболочка [26]. Рассмотренные в разд. 3 многомодовые световоды могут поддерживать распространение  $\sim 50 - 80$  разных мод (12–20 групп мод, различающихся индексами  $l$  и  $m$ ). Проведенные нами измерения в дальнем поле (угол наблюдения максимума мощности моды в дальнем поле прямо пропорционален  $q$  [27]) подтвердили вышесказанное и показали, что при установившемся распределении мощности между модами основная мощность излучения сосредоточена в модах с небольшим модовым числом  $q$ . Доля мощности таких мод, приходящаяся на область границы сердцевина–оболочка, меньше доли мощности, распространяющейся вдоль границы одномодовых световодов, поэтому и уровень избыточных потерь, связан-

ных с границей сердцевина–оболочка, должен быть у этих мод ниже.

– В одномодовых световодах со ступенчатым ППП уровень как полных [1, 28], так и избыточных потерь [19] значительно выше, чем в световодах с градиентным ППП (при молярных концентрациях  $\text{GeO}_2$ , превышающих 26 %, более чем в два раза). Небольшое уменьшение среднего уровня легирования по сечению сердцевина градиентного световода не способно объяснить столь резкого уменьшения оптических потерь. Проведенные нами исследования достаточно убедительно показывают, что уменьшение полных потерь в данном случае связано с уменьшением избыточных потерь на границе сердцевина–оболочка. Механизмы, привлекаемые для объяснения причин появления избыточных оптических потерь на границе [9, 23–25], связывают рост оптических потерь с величиной скачкообразного изменения одного из параметров (вязкость, состав стекла, коэффициент термического расширения (КТР)) на границе сердцевина и оболочки. Переход от ступенчатого ППП к градиентному увеличивает в несколько раз размер области, в которой происходит скачок вязкости, КТР и пр., делая его более плавным, что, видимо, и приводит к уменьшению избыточных потерь на границе. В многомодовых световодах ширина области перехода от сердцевина к оболочке в три-четыре раза больше, чем в одномодовых световодах. Можно предположить, что, как и в случае одномодовых световодов, это должно привести к уменьшению вклада потерь на границе сердцевина–оболочка в общие оптические потери.

Вышесказанное позволяет предположить, что оптические потери в многомодовых световодах близки к потерям за счет фундаментальных механизмов. По этой причине в высоколегированных одномодовых световодах, где высок уровень избыточных потерь, полные оптические потери оказываются значительно больше, чем в многомодовых световодах.

Отметим, что рассчитанные оптические потери в сердцевине световодов на длине волны 632.8 нм  $\alpha_{\text{cor}}$  (табл. 1) сравнимы с потерями в многомодовых световодах  $\alpha_{\text{MMF}}$ . Для германосиликатных световодов по расчету  $\alpha_{\text{cor}} \simeq 54$  дБ/км, а измеренные оптические потери в многомодовом световоде, вытнутом из той же заготовки, составили 77 дБ/км. Для фосфоросиликатного световода  $\alpha_{\text{cor}} \simeq 6.56$  дБ/км и  $\alpha_{\text{MMF}} \simeq 8.6$  дБ/км. Превышение оптических потерь в многомодовых световодах над расчетными потерями в сердцевине маломодовых световодов на 30 % можно объяснить остаточным уровнем избыточных потерь, возникающих на границе сердцевина–оболочка в многомодовых световодах.

Проведенные исследования позволяют также объяснить слабую зависимость оптических потерь в многомодовых световодах от температуры вытяжки. В отличие от избыточных потерь [6, 19], фундаментальные механизмы оптических потерь не проявляют существенной зависимости от температуры вытяжки [6, 19, 29]. Уменьшение вклада избыточных потерь в полные оптические потери в многомодовых световодах приводит к уменьшению этой зависимости.

## 6. Заключение

Исследованы оптические потери в одномодовых и многомодовых световодах с высокой концентрацией леги-

руюющей добавки. Обнаружено, что в высоколегированных многомодовых световодах в широком спектральном диапазоне оптические потери значительно меньше, чем в одномодовых световодах с такой же концентрацией легирующей добавки. Кроме того, в многомодовых световодах оптические потери практически не зависят от температуры вытяжки.

Разработана методика измерения оптических потерь отдельных мод в маломодовых высоколегированных световодах. Установлено, что меньшими оптическими потерями обладают те моды, у которых меньше доля мощности, распространяющаяся в области границы сердцевина – оболочка. Оценены оптические потери в области сердцевины и в области границы сердцевины – оболочка. Показано, что оптические потери в сердцевине световода близки к фундаментальным оптическим потерям, в то время как на границе сердцевина – оболочка наблюдается аномально высокий уровень оптических потерь, зависящий от температуры вытяжки световода. На основе полученных результатов предложено объяснение наблюдаемого поведения оптических потерь в одномодовых и многомодовых световодах.

Работа поддержана РФФИ (грант № 03-02-17544).

- Davey S.T., Williams D.L., Spirit D.M., Ainslie B.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1171**, 181 (1989).
- Dianov E.M., Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Sazhin O.D., Guryanov A.N., Khopin V.F., Vechkanov N.N. *Opt. Fiber Technol.*, **3**, 77 (1997).
- Abramov A.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Golant K.M., Khrapko R.R., Semjonov S.L., Shchebunjaev A.G., Guryanov A.N., Khopin V.F. *Tech. Dig. OFC'95* (San Diego, California, 1995, WP4, p.173).
- Onishi M., Kashawada T., Ishiguro Y., Koyano Y., Nishimura M., Kanamory H. *Fiber Integr. Opt.*, **16**, 277 (1997).
- Ainslie B.J., Beales K.J., Cooper D.M., Day C.R., Rush J.D. *J. Non-Cryst. Sol.*, **47**, 243 (1982).
- Guenot P., Nouchi P., Poumellec B. *Tech. Dig. OFC'99* (San Diego, California, 1999, ThG2-1, p.84).
- Mashinsky V.M., Dianov E.M., Neustruev V.B., Lavrishchev S.V., Guryanov A.N., Khopin V.F., Vechkanov N.N., Sazhin O.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2290**, 105 (1994).
- Lines M.E., Reed W.A., Di Giovanni D.J., Hamblin J.R. *Electron. Lett.*, **35**, 1009 (1999).
- Kajioka H., Kumagai T., Ishikawa T., Teraoka T. *Tech. Dig. OFC'88* (New Orleans, Louisiana, 1988, W13, p.75).
- Dianov E.M., Kurkov A.S., Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Guryanov A.N., Devyatykh G.G., Khopin V.F., Miroshnichenko S.I., Vechkanov N.N. *Tech. Dig. OFC/IOOC'93* (San Jose, California, 1993, TuL1, p.51).
- Rawson E.G. *Appl. Opt.*, **11**, 2477 (1972).
- Sudo S., Itoh H. *Opt. Quantum Electron.*, **22**, 187 (1990).
- Tsujikawa K., Ohashi M., Shiraki K., Tateda M. *Electron. Lett.*, **30**, 351 (1994).
- Tajima K., Ohashi M., Shiraki K., Tateda M., Shibata S. *J. Light-wave Technol.*, **10**, 1532 (1992).
- Bubnov M.M., Dianov E.M., Egorova O.N., Semjonov S.L., Guryanov A.N., Khopin V.F., DeLiso E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 12 (2000).
- Ainslie B.J., Beales K.J., Day C.R., Rush J.D. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 854 (1981).
- Izawa T., Shibata N., Takeda A. *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 33 (1977).
- Plotnichenko V.G., Sokolov V.O., Kryukova E.B., Dianov E.M. *J. Non-Crystal. Sol.*, **270**, 20 (2000).
- Лихачев М.Е., Бубнов М.М., Семенов С.Л., Швецов В.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **33**, 633 (2003).
- Marcuse D. *Appl. Opt.*, **14**, 3021 (1975).
- Rawson E.G. *Appl. Opt.*, **13**, 2370 (1974).
- Bubnov M.M., Semjonov S.L., Likhachev M.E., Dianov E.M., Khopin V.F., Salganskii M.Yu., Guryanov A.N., Fajardo J.C., Kuksenkov D.V., Koh J., Mazumde P. *ECOC'2003* (Rimini, Italy, 2003, Tu1.7.3, p. 212).
- Atkins G.R., Poole S.G., Sceats M.G., Simmons H.W., Nockolds C.E. *Electron. Lett.*, **27**, 1432 (1991).
- Biryukov A.S., Dianov E.M., Kurkov A.S., Devyatykh G.G., Guryanov A.N., Gusovskii D.D., Kobis S.V. *Tech. Dig. ECOC'96* (Oslo, Norway, 1996, TuP.02, p.2.225).
- Ohashi M., Tateda M., Shiraki K., Tajima K. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **5**, 812 (1993).
- Gloge D. *Appl. Opt.*, **10**, 2252 (1971).
- Gloge D. *Bell Syst. Tech. J.*, **51**, 1767 (1972).
- Ainslie B.J., Beales K.J., Cooper D.M., Day C.R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **425**, 15 (1983).
- Guenot P.L., Nouchi P., Poumellec B., Mercereau O. *Proc. 45th Intern. Wire & Cable Symp.* (Eatontown, New Jersey, 1996, p.679).