

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ОДНОМОДОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА С КВАРЦЕВОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

И.И. Долгов¹, Г.А.Иванов², Ю.К. Чаморовский², М.Я. Яковлев³

¹ЗАО «Лаборатория Ивана Долгова» (ЗАО «ЛИД»)

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН

³ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-ВОС»

ВВЕДЕНИЕ

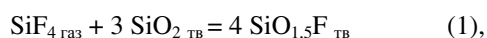
Перспективы применения ОВ в ВОСПИ и устройствах, работающих в условиях повышенной радиации, вызвали интенсивные исследования радиационно-оптических явлений в кварцевых ОВ, поскольку под действием ионизирующего излучения эти ОВ могут терять свою пропускную способность [1]. Основная причина роста потерь заключается в возникновении центров окраски (ЦО) в световедущей сердцевине или в светоотражающей оболочке, по которой в одномодовых ОВ распространяется значительная часть света. Природа и количество ЦО в значительной степени зависят от состава стекол сердцевинной и оболочечной, а также способа изготовления ОВ.

В настоящее время наиболее радиационно-стойкими считаются ОВ с чисто кварцевой сердцевинной или сердцевинной, легированной азотом [2]. Обычные «связные» ОВ с германосиликатной сердцевинной обладают повышенным радиационно-наведенным затуханием (РНЗ) из-за образования германиевых кислородно-дефицитных центров (ГКДЦ) [3]. Для создания заготовок ОВ с кварцевой сердцевинной необходимо формирование светоотражающей фторсиликатной оболочечной, имеющей показатель преломления (ПП) меньше ПП кварцевого стекла. Такие заготовки могут быть получены методом MCVD, который является единственным промышленно- освоенным методом в РФ. Заготовки с кварцевой сердцевинной, легированной азотом, были получены на лабораторной установке СВЧ-методом [4], т.к. методом MCVD удастся ввести в кварцевую сердцевинну лишь очень небольшое количество азота (достигнутое изменение ПП = 0.0015) [5]. В данной работе приведены результаты по разработке технологии получения одномодовых ОВ с кварцевой сердцевинной и светоотражающей фторсиликатной оболочечной методом MCVD, по исследованию основных характеристик ОВ и по изучению зависимости РНЗ в процессе и после окончания как статического (Co^{60}), так и импульсного γ -облучения.

ФОРМИРОВАНИЕ ФТОРСИЛИКАТНОЙ ОБОЛОЧКИ

Первоначально для легирования кварцевого стекла фтором при получении заготовок методом MCVD чаще использовали фреоны (12 или 113), однако уменьшение ПП фторсиликатного стекла по отношению к кварцевому стеклу (Δn) не превышало -3.5×10^{-3} . Применение в качестве фторагента SF_6 позволило увеличить концентрацию фтора в стекле и соответственно понизить ПП фторсиликатного стекла до величины $\Delta n \approx -5 \times 10^{-3}$ при мольном отношении $m_{SF_6} / m_{SiCl_4} \approx 0.4$ в исходной парогазовой смеси (ПГС) [6]. Это обусловлено тем, что для увеличения концентрации фтора в стекле необходимо увеличивать концентрацию SF_4 в ПГС, однако при увеличении этого отношения значительно снижается скорость осаждения слоев фторсиликатного стекла из-за взаимодействия SF_6 с $SiCl_4$ и SiO_2 с образованием SiF_4 - наиболее устойчивого газообразного соединения, которое выносится из опорной трубки. Оба эти альтернативных фактора и обуславливают получение относительно небольшой величины Δn , которая может приводить к значительным изгибным и микроизгибным потерям в волокне.

При использовании в качестве фторагента SiF_4 взаимодействие его с $SiCl_4$ и травление стекла не происходит, а вхождение фтора в кварцевое стекло описывается следующим уравнением [7]:



из которого следует, что концентрация фтора в стекле должна зависеть от концентрации SiF_4 в ПГС в степени $1/4$.

Были изучены два процесса формирования фторсиликатного стекла:

одностадийный, в котором одновременно осаждали и остекловывали слои, и двухстадийный, в котором первоначально осаждали пористые слои кварцевого стекла, а затем их остекловывали в атмосфере SF_4 или SF_4+O_2 . На рис. 1 приведены зависимости изменения ПП фторсиликатного стекла без подачи и при подаче в опорную трубку дополнительного кислорода (350 мл/мин) в одностадийном процессе, а также при изменении скорости перемещения горелки. Видно, что при исключении подачи дополнительного кислорода

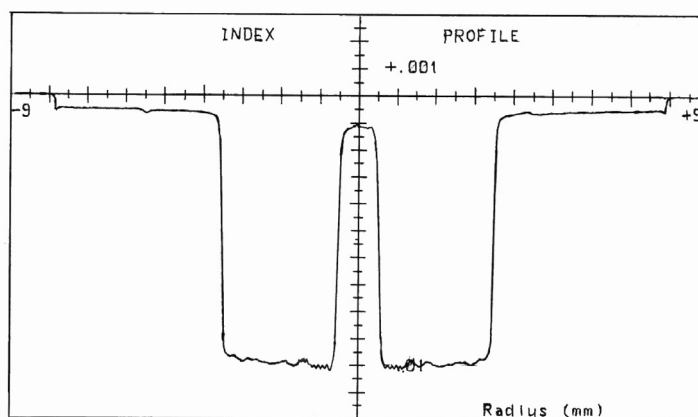


Рис. 1. Типичный профиль показателя преломления в исходной заготовке с кварцевой сердцевинной (1) и фторсиликатной светоотражающей оболочечной (2).

(т.е. при увеличении концентрации SiF_4 в ПГС) и при уменьшении скорости перемещения горелки (соответственно при увеличении толщины осаждаемого слоя) ПП фторсиликатного стекла уменьшается и величина Δn достигает $-(8,5 - 10) \times 10^{-3}$. Тот факт, что при увеличении толщины осаждаемого слоя ПП фторсиликатного стекла уменьшается из-за увеличения концентрации фтора в стекле согласуется с данными [7] и объясняется меньшим испарением фтора из более толстого слоя в процессе остекловывания последнего.

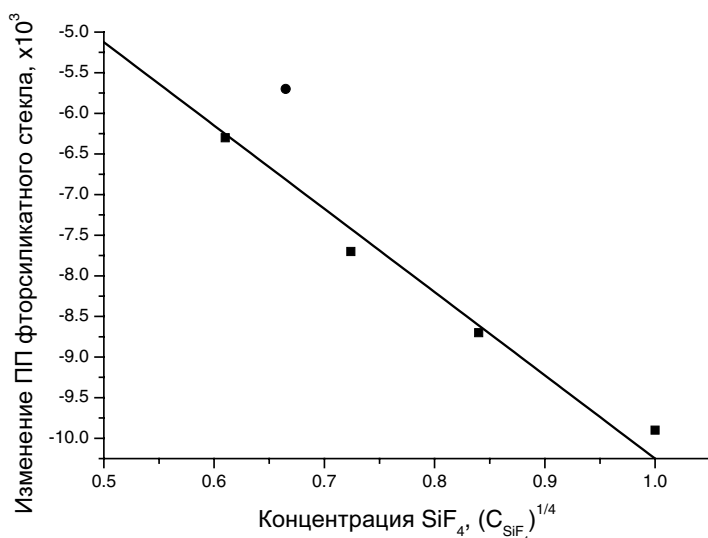


Рис. 2. Зависимость изменения ПП фторсиликатного стекла от концентрации SiF_4 в ПГС во время остекловывания слоя.

■ - скорость перемещения горелки при остекловывании слоя 100 мм/мин.
● - скорость перемещения горелки при остекловывании слоя 200 мм/мин.

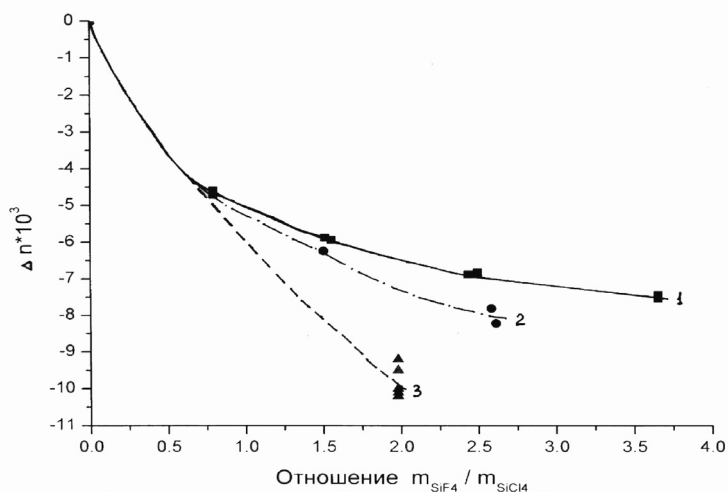


Рис. 3. Зависимость разности показателей преломления кварцевого и фторсиликатного стекол от мольного отношения SiF_4 к SiCl_4 в исходной ПГС:

1 – при подаче дополнительного кислорода 350 мл/мин и скорости горелки 140 мм/мин,
2 – без подачи дополнительного кислорода и скорости горелки 140 мм/мин,
3 – без подачи дополнительного кислорода и скорости горелки 120 мм/мин

На рис. 2 приведена зависимость изменения ПП фторсиликатного стекла от концентрации SiF_4 в ПГС, поступающего в трубку на стадии остекловывания пористого слоя при двухстадийном процессе. Пористый слой SiO_2 наносили при «обратном» ходе горелки, когда горелка двигалась в направлении противоположном движению ПГС в трубке, а остекловывание слоя осуществляли при «прямом» ходе горелки, когда направления движения горелки и ПГС совпадали. Концентрацию SiF_4 изменяли путем изменения величины потока дополнительного кислорода, поступающего в трубку при постоянной скорости поступления SiF_4 . Видно, что зависимость разности ПП кварцевого и фторсиликатного стекол близка к $\Delta n = A \times (C_{\text{SiF}_4})^{1/4}$. Последнее согласуется с вышеизложенными теоретическими предсказаниями (см. уравнение 1). Результаты, приведенные на рис. 2, показывают также, что увеличение скорости перемещения горелки при остекловывании пористого слоя приводит к меньшей величине Δn . Это, вероятно, обусловлено меньшим временем экспонирования пористого слоя в парах SiF_4 и, следовательно, меньшим количеством фтора, внедряющегося в стекло. Величина Δn достигала в двухстадийном процессе $\sim -10 \times 10^{-3}$. Следует заметить, что хотя в двухстадийном процессе меньше расход SiF_4 , сам процесс является более сложным и длительным. Поэтому, по нашему мнению, для промышленного производства заготовок данного типа ОВ более предпочтительным является одностадийный процесс.

На основе вышеуказанных исследований была разработана технология формирования светоотражающей фторсиликатной оболочки с величиной $\Delta n \sim -(8,5-9,5) \times 10^{-3}$ при использовании в качестве фторагента SiF_4 [8], производимого во ФГУП ВНИИХТ. После окончания осаждения фторсиликатной оболочки внутри опорной трубки наносили слои SiO_2 , формирующие сердцевину световода, при окислении SiCl_4 . На рис. 3 приведен типичный профиль ПП, измеренный с помощью преформанализатора Р-101 в заготовке с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной оболочкой. Оптические волокна вытягивали на вытяжной установке с применением высокотемпературной графитовой печи с одновременным нанесением защитно-упрочняющего двухслойного УФ-отверждаемого уретанакрилатного покрытия. Диаметр кварцевого волокна составлял $125 \pm 1,5$ мкм, а диаметр волокна с покрытием 245 ± 10 мкм.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЛОКОН

Световоды с кварцевой сердцевиной и депрессированной фторсиликатной оболочкой имеют ряд особенностей. Ввиду того, что постоянная распространения основной моды (LP_{01}) лежит в области значений меньших, чем постоянная распространения в технологической кварцевой оболочке, такого типа оптические волокна работают в режиме вытекания основной моды. В этом случае для получения малых избыточных потерь толщина депрессированной светоотражающей оболочки должна быть значительно больше диаметра сердцевины. Однако это связано со значительными технологическими трудностями. Поскольку диаметр оболочки почти пропорционален корню квадратному из числа осажденных слоев, то при увеличении отношения $d_{об}/d_{сер}$, хотя бы с 5 до 7 требуется увеличение числа слоев почти в 2 раза. Это соответственно увеличивает расход материала, удлиняет время процесса и увеличивает вероятность сбоя процесса. Поэтому важной являлась задача оптимизации основных параметров заготовок и ОВ.

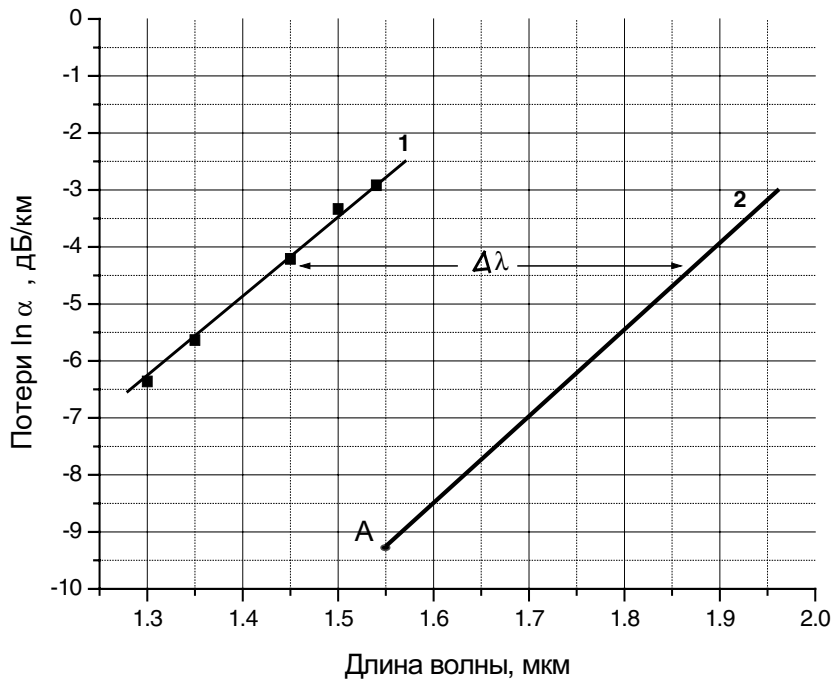


Рис. 4. Схема расчета оптимальной длины волны отсечки в ОВС:
1 – спектральная зависимость полных потерь в оттяжке из исходной заготовки,
2 – параллельный перенос линии 1,
A – задаваемый уровень избыточных потерь на рабочей длине волны - 1,55 мкм

Теоретический анализ одномодовых структур с депрессированной оболочкой показывает, что потери на вытекание основной моды экспоненциально зависят от волнового вектора $k = 2\pi/\lambda$, т.е. построенные в логарифмическом масштабе потери должны иметь линейную зависимость от $1/\lambda$. Поскольку в нашем случае диапазон измеряемых длин волн мал, то должна наблюдаться линейная зависимость непосредственно от длины волны. Исходя из этого, был предложен [9] метод экспериментального определения длины волны отсечки, обуславливающий низкие потери в ОВС данного типа. Этот метод проиллюстрирован на рис. 4. Вытягиваем некоторый кусок волокна (обычно длиной ~ 250 м) произвольным диаметром и измеряем в нем спектральную зависимость потерь

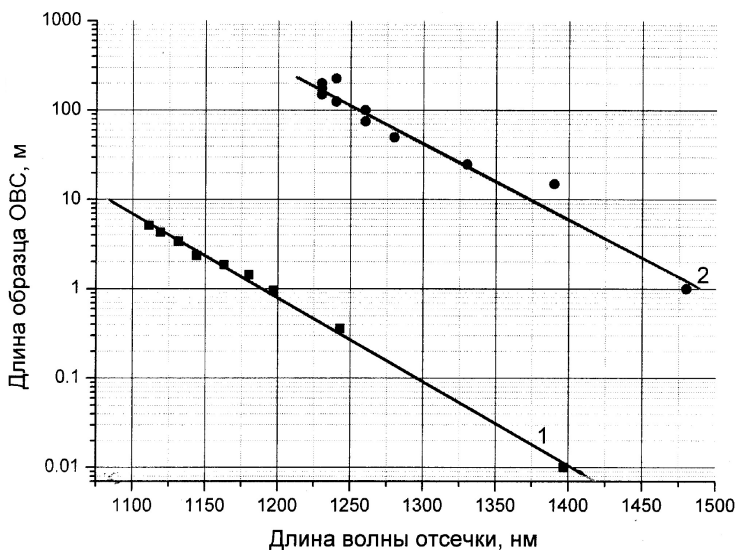


Рис. 5. Спектральные зависимости полных потерь в образцах волоконных световодов с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной оболочкой, при изготовлении которых использовали опорные трубки из стекла типа А (1) и типа В (2)

и длину волны отсечки. Спектральная зависимость потерь строится в координатах $\ln \alpha = f(\lambda)$. Рост потерь при $\lambda > 1,3$ мкм обусловлен вытеканием основной моды. Затем задается допустимый уровень избыточных потерь (например, 0,1 дБ/км, что соответствует $\ln \alpha = -9,2$) и проводится прямая, параллельная участку с вытеканием моды. Для получения заданного уровня избыточных потерь длина волны отсечки должна быть увеличена на $\Delta\lambda$ (в данном случае $\Delta\lambda \approx 0,43$ мкм). "Жакетированием" или шлифовкой исходной заготовки можно обеспечить требуемый диаметр волокна (обычно 125 мкм) при рассчитанной длине волны отсечки. Этот метод достаточно хорошо оправдал себя и позволил получить ОВС с потерями до 0,3 дБ/км на $\lambda = 1,55$ мкм, как это видно из рис. 5.

Для волокон данного типа наблюдалась сильная зависимость измеряемой, т.е. эффективной, длины волны отсечки от длины световода, обусловленная, вероятно, установлением режимов вытекания мод. На рис. 6 приведены эти зависимости для двух образцов, отличающихся профилем ПП и диаметром сердцевины. Видно, что в полулогарифмическом масштабе эти зависимости носят линейный характер и простираются вплоть до длины образца ОВС ~ 200 м.

Наличие зависимости длины волны отсечки от длины образца необходимо учитывать для обеспечения одномодового режима работы ВС, которые используются в различных системах и поэтому могут иметь разную длину (например, в протяженных системах передачи информации $L > 200$ м, во внутриобъектовых линиях связи $L < 100$ м, а в волоконно-оптических датчиках $L \leq 10-15$ м). Кроме того, различие длины волны отсечки для коротких и протяженных образцов надо иметь в виду при применении стандартного метода измерения $\lambda_{с.}$, когда используют отрезки длиной 1-2 м.

Выявлены зависимости величины дополнительных потерь и длины волны отсечки от условий вытяжки волокна, в частности, от величины натяжения волокна. Эти зависимости приведены на рис. 7 и показывают, что с ростом натяжения волокна длина волны отсечки уменьшается, и увеличиваются дополнительные потери в ВС. Подобные зависимости наблюдали авторы [10], которые считают, что данный эффект связан с изменением напряжений в волокне при изменении его натяжения и, соответственно, с изменением разности ПП фторсиликатного и кварцевого стекол. Для световодов с германосиликатной сердцевиной подобное поведение японскими авторами не установлено.

Поскольку можно предполагать, что в световодах с депрессированной оболочкой величина изгибных потерь может возрастать, нами была исследована зависимость величины дополнительных потерь от радиуса изгиба при намотке одного витка волокна на стержень определенного диаметра и при нагрузке 2Н. Установка и методика измерений описаны в [11]. Полученная зависимость, приведенная на рис. 8, показывает, что при радиусе изгиба более 5 мм величина изгибных потерь очень мала, но при уменьшении радиуса изгиба потери начинают значительно возрастать.

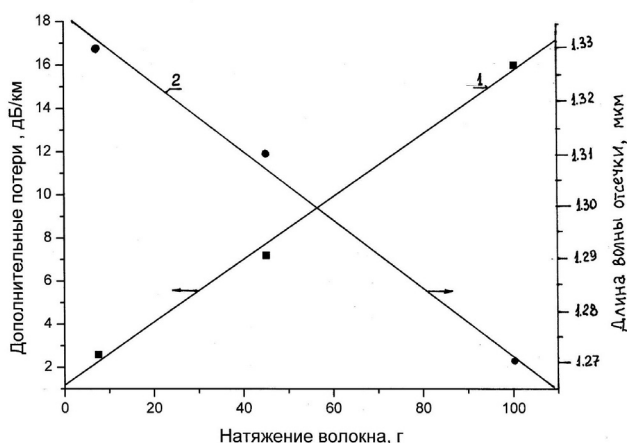
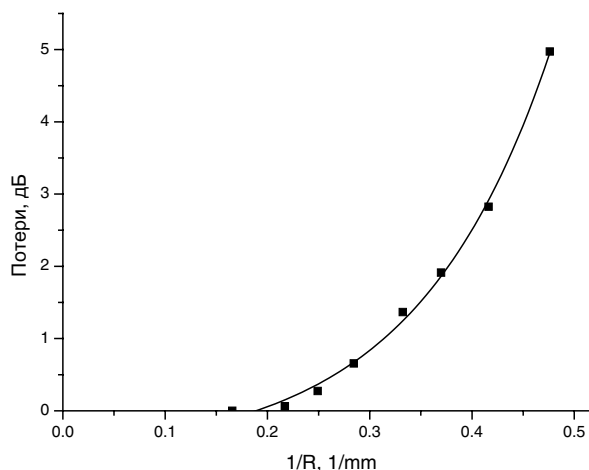


Рис. 7. Зависимость дополнительных потерь (1) и длины волны отсечки (2) от величины натяжения волокна при вытяжке одномодовых световодов с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной светотражающей оболочкой

Рис. 6. Зависимость длины волны отсечки от длины световодов, вытянутых из исходных заготовок:

**1 – ОВС с профилем 1,
2 – ОВС с профилем 2
на рис. 3.**



Диаметр модового пятна, измеренный по стандарту ТИА [12], составлял в ОВ 9.2 ± 0.2 мкм на $\lambda = 1.55$ мкм.

На основе разработанных оптических волокон в ОКБ КП изготовлены двухволоконные оптические кабели ленточного типа, в которых волокно лежало в «свободном» состоянии. Полные потери в кабеле составляли 0.26 дБ/км на $\lambda = 1.55$ мкм. Несколько меньшие потери в волокне в составе кабеля по сравнению с потерями в волокне, намотанном на транспортную катушку, объясняются, вероятно, микроизгибами при многослойной намотке волокна на катушку.

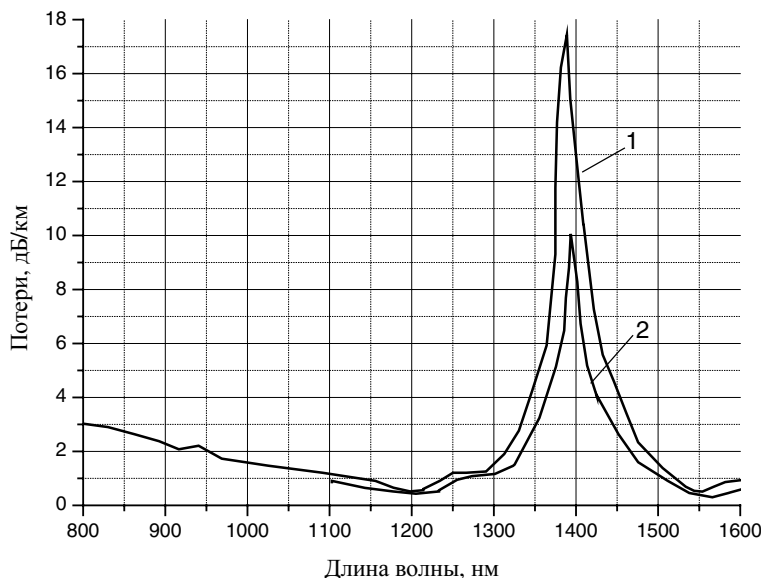


Рис. 8. Зависимость дополнительных потерь от радиуса изгиба волокна (1 виток по радиусу R)

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЦИОННО-НАВЕДЕННОГО ЗАТУХАНИЯ

Измерение радиационно-наведенного затухания (РНЗ) в ОВ с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной светоотражающей оболочкой осуществлялось ЗАО "ЛИД". При изготовлении заготовок данных ОВ использовали трубки трех типов:

тип А - трубки из стекла марки "Suprasil F-300" фирмы "Heraeus" (Германия), изготовленные при высокотемпературном окислении четыреххлористого кремния в ВЧ-плазме;

тип Б - трубки, изготовленные на Миасском машиностроительном заводе из стекла марки КС-4В, разработанного в Институте химии силикатов РАН (г. Санкт-Петербург);

тип В - трубки из кварцевого стекла марки КУВИ, изготовленные на Гусь-Хрустальном заводе технического стекла методом газопламенного наплава.

Исследование концентрации гидроксильных ионов (S_{OH}) в толще стенок указанных труб показало [13], что для труб типа А и Б $S_{OH} < 0,2 \div 0,3$ ppm (предел чувствительности измерений), в то время как для труб типа В $S_{OH} < 180 \div 200$ ppm.

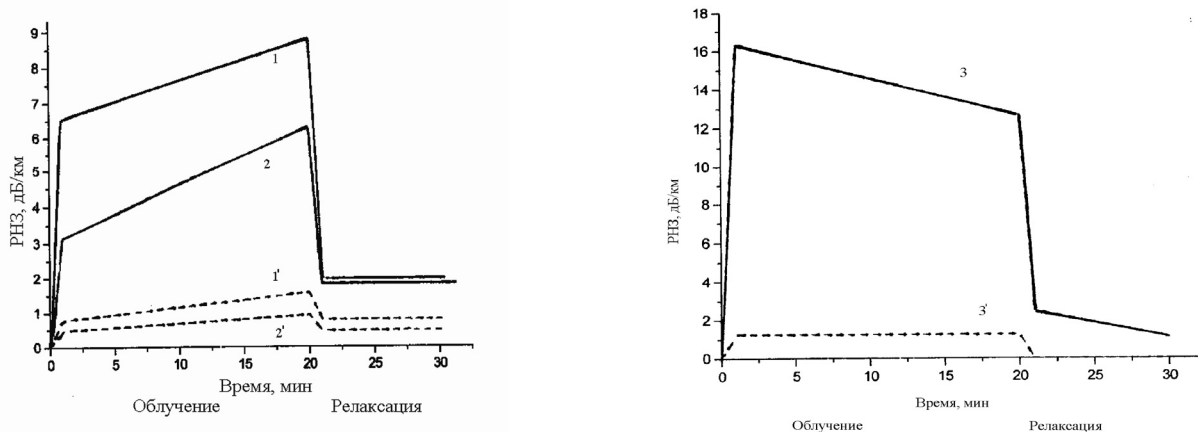


Рис. 9. Зависимости радиационно-наведенного затухания (РНЗ) от дозы γ -облучения (максимальная доза 5.5×10^4 p) для образцов ОВ, при изготовлении которых использовали опорные трубки из стекол А (1), Б (2) и В (3). Мощность света (W) на выходе ОВ: 1, 2, 3 - $W \approx -25,2$ дБм, 1', 2', 3' - $W \approx -3,6$ дБм

Были проведены измерения величины РНЗ как при стационарном γ -облучении на установке ГУ-200 с использованием Co^{60} , так и при импульсном облучении на установках ЛИУ-10 и РИУС-5 [14]. На рис. 9 (а и б) приведены зависимости РНЗ от времени (дозы) облучения на установке ГУ-200 для образцов ОВ, при изготовлении которых использовали вышеуказанные трубы. Мощность облучения составляла 45,8 р/с, а максимальная доза облучения – $5,5 \times 10^4$ р. Видно, что в начале облучения наблюдается резкое увеличение РНЗ, характерное для кварцевого стекла, а в дальнейшем приведенные зависимости отличаются не только величиной, но и характером поведения. Так, для образцов, полученных при использовании "сухих" труб (типа А и Б), происходит рост РНЗ от дозы облучения, а для образца с использованием трубки В, имеющей высокую концентрацию гидроксильных групп, характерно уменьшение РНЗ. Согласно литературным данным [например, 2,15] это поведение объясняется "залечиванием" гидроксильными группами кислородно-дефицитных центров, возникающих при облучении. Из рис. 9 также видно, что увеличение мощности света, пропускаемого по ОВ, ведет к значительному снижению РНЗ. Этот эффект хорошо известен в литературе, и его обычно называют "фотоотжигом" [15].

Приведенные на рис. 9 зависимости спада РНЗ после окончания облучения свидетельствуют о существовании короткоживущих и долгоживущих ЦО. Короткоживущие ЦО обычно связывают с возникновением экситонов (электронов и дырок) на границах доменов в стекле при его облучении [16], а долгоживущие ЦО – с разрывом связи Si-O [17]. При этом число короткоживущих ЦО пропорционально мощности дозы и обратно пропорционально вводимой оптической мощности в ОВ, а концентрация долгоживущих ЦО пропорциональна поглощенной дозе [15, 18]. Наилучшие результаты были получены для ОВ из опорных трубок типа А: при комнатной температуре и дозе облучения $5,5 \times 10^4$ р максимальная величина РНЗ на $\lambda = 1,55$ мкм составляла $\sim 2,9$ дБ/км при мощности оптического сигнала $W = -25,2$ дБм и $\sim 0,9$ дБ/км при $W = -3,6$ дБм, причем через 60 с после окончания воздействия РНЗ уменьшалась до $\sim 1,0$ дБ/км и $\sim 0,5$ дБ/км соответственно.

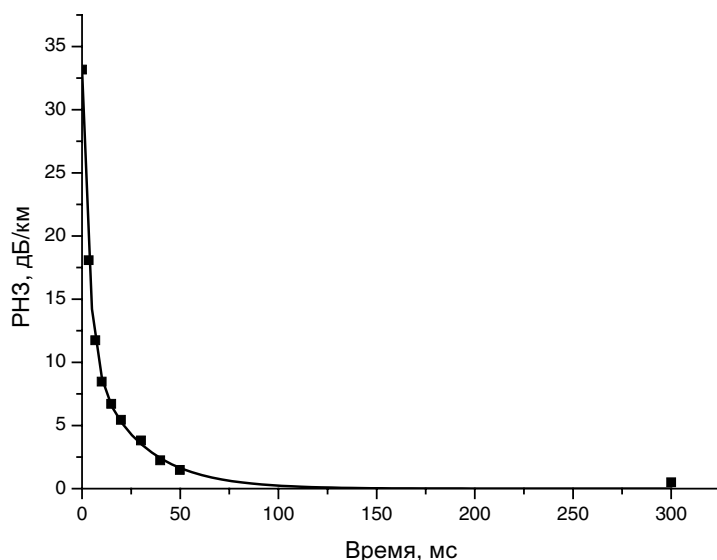


Рис. 10. Зависимость РНЗ от времени после окончания импульсного ионизирующего воздействия при комнатной температуре на ОВ, использующее трубку типа Б (уровень – $1,3 \times 10^9$ р/с, $\lambda_{\text{раб.}} = 1,55$ мкм, $W = -23,7$ дБм)

С понижением температуры образцов до $\approx -60^\circ \text{C}$ РНЗ значительно возрастает (до ≥ 100 дБ/км) при $W \approx -25$ дБм и дозе облучения $2,75 \times 10^4$ р, в то время как при мощности света $W = -(3-5)$ дБм при той же температуре максимальная величина РНЗ не превышала 2,3-3,9 дБ/км для различных типов трубок.

Были исследованы зависимости РНЗ от времени после окончания импульсного ионизирующего воздействия ($\tau_{\text{эф.}} \sim 21$ нс, уровень $\sim (1,5 \pm 0,5) \times 10^9$ р/с) для различных длин волн зондирующего света (0,85; 1,3 и 1,55 мкм) и в температурном интервале $-60^\circ \text{C} \div +20^\circ \text{C}$. Для примера на рис. 10 приведена зависимость РНЗ от времени после окончания воздействия для $\lambda = 1,55$ мкм. Видно, что основная часть короткоживущих ЦО исчезает в течение ~ 50 мс, а через ~ 100 мс величина потерь практически восстанавливается до исходного значения. При этом в интервале от 0 до 50 мс после окончания импульсного облучения время спада РНЗ достаточно хорошо описывается общепринятой бимолекулярной теорией [19]. Исследования показали, что, несмотря на некоторое различие эффективности "фотоотжига" для различных длин волн зондирующего света, наиболее перспективным, на наш взгляд, является "фотоотжиг" на рабочей длине волны (в частности, на $\lambda = 1,55$ мкм), который проще и дешевле для использования в волоконно-оптических системах передачи информации. Повышение оптической мощности вводимого света до $W = -3$ дБм и более приводит практически к полному восстановлению светопропускания ОВ за 500 мс во всем исследованном интервале температур ($-60^\circ \text{C} \div +20^\circ \text{C}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе изучения процессов формирования фторсиликатного стекла при использовании в качестве фторагента SiF₄ разработана технология получения методом MCVD заготовок одномодовых оптических волокон с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной светоотражающей оболочкой с разностью показателей преломления между сердцевиной и оболочкой $\Delta n = (8.5 \pm 10) \times 10^{-3}$.
2. Исследованы основные оптические свойства данных волокон и получены образцы с потерями до 0.3 дБ/км на $\lambda = 1.55$ мкм. Установлены зависимости длины волны отсечки в этих волокнах от длины образцов и условий вытяжки волокна. На основе разработанных волокон изготовлены образцы двухволоконного оптического кабеля ленточного типа, в которых не наблюдается увеличение потерь по сравнению с исходным волокном.
3. Проведены измерения величины радиационно-наведенного затухания как при стационарном, так и при импульсном γ -облучении одномодовых оптических волокон. Наилучшие результаты были получены для ОВ, изготовленных при использовании опорных трубок "Suprasil F-300": при комнатной температуре и дозе γ -облучения 5.5×10^4 р в стационарных условиях максимальная величина РНЗ на $\lambda = 1.55$ мкм составляла ~ 2.9 дБ/км при $W = -25.2$ дБм и ~ 0.9 дБ/км при $W = -3.6$ дБм, причем через 60 с после окончания воздействия РНЗ уменьшалось до ~ 1.0 дБ/км и ~ 0.5 дБ/км соответственно. После окончания импульсного ионизирующего воздействия (тэфф. ~ 21 нс, уровень $\sim 1.5 \times 10^9$ р/с) величина потерь на $\lambda = 1.55$ мкм практически восстанавливается до исходного значения через ~ 100 мс для всех типов образцов при комнатной температуре, а в интервале температур $-600\text{C} \div +200\text{C}$ через ~ 500 мс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дианов Е.М., Корниенко Л.С., Никитин Е.П. и др. Радиационно-оптические свойства волоконных световодов на основе кварцевого стекла // Квант. Электроника. – 1983. – Т.10, № 3. – С.473.
2. Томашук А.Л., Голант К.М., Забейсайлов М.О. Разработка волоконных световодов для применения при повышенном уровне радиации // Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства. – М., 2001. – № 4. – С. 52.
3. Гурьянов А.Н., Ким В.М., Машицкий В.М., Неуструев В.Б. и др. Основные радиационные эффекты в германо-силикатном стекле и волоконных световодах на его основе // Труды ИОФАН. – 1990. – Т. 23. – С. 94.
4. Dianov E.M., Golant K.M., Khrapko R.R., Tomashuk A.L. Nitrogen doped silica core fibres: a new type of radiation-resistant fibre // Electron. Lett. – 1993. – Vol. 31, № 17. – P. 1490.
5. Левит Л.Г., Ероньян М.А., Кондратьев Ю.Н. Получение кварцевого стекла, легированного азотом методом MCVD // Физика и химия стекла, 2000. – Т. 23, № 5. – С. 729.
6. Аксенов В.А., Иванов Г.А., Исаев В.А. и др. Низкоапертурные волоконные световоды // Высокочистые вещества. – 1996. – № 6. – С. 30.
7. Kirchof J., Unger S., Knappe B. et al. About the Fluorine Chemistry in MCVD: The Mechanism of Fluorine Incorporation into SiO₂ Layers // Cryst. Res. Technol. – 1987. – Vol. 22, № 4. – P. 495.
8. Аксенов В.А., Белов А.В., Иванов Г.А. и др. Волоконные световоды с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной оболочкой // Труды междунар. конф. IT+SE 2001. – Гурзуф, 2001. – С. 284.
9. Аксенов В.А., Белов А.В., Воробьев И.Л., Иванов Г.А. и др. Оптимизация параметров одномодовых волоконных световодов с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной оболочкой // Труды LVII научной сессии РНТОРЭС. – 2002. – Т. 1. – С. 218.
10. Hibino Y., Hanawa F., Hariquchi M. Drawing-induced residual stress effects on optical characteristics in pure-silica-core single mode fibers // J. Appl. Phys. – Vol. 65, № 1. – P. 30
11. Аксенов В.А., Воробьев И.Л., Иванов Г.А. и др. Потери в одномодовых световодах с треугольным профилем показателя преломления на однократных изгибах по малому радиусу // Радиотехника. – 2004. – № 12. – С. 27.
12. Jung M. Modefield diameter of single-mode optical fiber by farfield scanning // Appl. Opt. – 1998. – Vol. 37, № 24. – P. 5605.
13. Plotnichenco V.G., Ivanov G.A., Kryukova E.B. et al. Influence of Molecular Hydrogen Diffusion on Concentration and Distribution of Hydroxyl Groups in Silica Fibers // J. Lightwave Technology. – 2005. – Vol. 23, № 1. – P. 341.
14. www.risi.h12.ru/test.php.
15. Friebele E.J., Long J., Askins C.G. et al. Overview of Radiation Effects in Fiber Optics // SPIE. – 1985. – Vol. 541. – P. 70.
16. Степанов В.А. Радиационно-индуцированные изменения оптических свойств стекол // Тезисы докладов VII междунар. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. – СПб., 2002. – С. 195.
17. Gavrilov V. B., Galutin A.I., Gershtein Y.S. et al. Absorption Spectra of Pure Quartz Fiber Lightguides Irradiated with γ -Quanta from a ⁶⁰Co Source // Nuclear Experim. Techniques. – 1997. – Vol. 40, № 4. – P. 457.
18. Sandhage K.H., Bocko P.L., DeJong B.H. A Two-Defect Model for Radiation-Induced Attenuation in multimode Fiber // SPIE. – 1988. – Vol. 992. – P. 110.
19. Griszom D.L. Thermal Bleaching of X-ray-Induced Defect Centers in High Purity Fused Silica by Diffusion of Radiolytic Molecular Hydrogen // J. Noncryst. Solids. – 1984. – Vol. 68. – P. 301.