

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ  
при ИНСТИТУТЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

**на правах рукописи**

**САЖИН ОЛЕГ ДМИТРИЕВИЧ**

**СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ГЕРМАНОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА  
И ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ  
НА ЕГО ОСНОВЕ**

Специальность 01 04 07–Физика конденсированного состояния

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Москва – 2002

Работа выполнена в Научном центре волоконной оптики при Институте общей физики РАН

Научный руководитель кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Машинский Валерий Михайлович

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук  
профессор Денкер Борис Ильич  
ИОФ РАН  
кандидат физико-математических наук  
с н с Чаморовский Юрий Константинович  
ИРЭ РАН

Ведущая организация Научно исследовательский институт ядерной  
физики МГУ им М.В.Ломоносова

Защита состоится "24" сентября 2002г в 15 час  
на заседании диссертационного совета Д002 063 02  
Института общей физики РАН по адресу 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН

Автореферат разослан "24" сентября 2002 г

Ученый секретарь диссертационного совета  
к ф -м.н

Макаров В П

2002-А  
8092

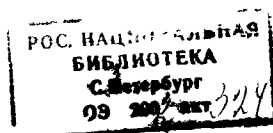
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке и применению волоконно-оптических усилителей, волоконных компенсаторов дисперсии [1], преобразователей частоты излучения на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния, брэгговских и длиннопериодных решеток в качестве элементов волоконно-оптических линий связи. Для этих применений необходимо использовать волоконные световоды (ВС) с высокой концентрацией диоксида германия ( $\text{GeO}_2$ ) в сердцевине. Однако в одномодовых волоконных световодах (ОВС) с концентрацией  $\text{GeO}_2$  в сердцевине более 16-18 мол %, изготовленных методом внутреннего осаждения из газовой фазы (MCVD), появляются дополнительные (избыточные) оптические потери, быстро растущие с увеличением содержания  $\text{GeO}_2$  и сильно зависящие от условий вытяжки, физическая природа которых в настоящее время не ясна. Для MCVD световодов до недавнего времени минимальные потери составляли несколько дБ/км. Такой уровень потерь значительно снижает качество компенсаторов и эффективность усилителей, поэтому изучение природы потерь в ВС из высоколегированного германосиликатного стекла (ГСС) представляет интерес не только с научной, но и с прикладной точки зрения.

Важную роль в современной волоконной оптике играют брэгговские и длиннопериодные решетки показателя преломления (РПП) в волоконных световодах. Для записи которых используется явление фоторефрактивности легированного кварцевого стекла, то есть изменение показателя преломления под действием УФ излучения. РПП являются одними из основных элементов волоконных лазеров и оптических усилителей. На основе РПП созданы полностью волоконные мультиплексоры и демultipлексоры, различные типы сенсоров. Известно, что запись РПП наиболее эффективна в световодах с высокой концентрацией диоксида германия и связана с точечными дефектами ГСС. В то же время механизм явления фоторефрактивности в ГСС изучен далеко не полностью.

Голографическая запись решеток показателя преломления в световодах с германосиликатной сердцевиной требует продолжительной экспозиции под УФ излучением, что усложняет технику и негативно отражается на качестве РПП. Для увеличения эффективности записи РПП в стекле сердцевины световода ведется поиск других легирующих добавок, повышающих его фоточувствительность. В частности, было экспериментально показано, что



дополнительное легирование азотом повышает фоточувствительность ГСС. Однако механизм влияния азота не был выявлен.

#### Целью диссертационной работы являлись:

- изучение дефектов в высоколегированных германосиликатных одномодовых волоконных световодах для выяснения природы оптических потерь и поиск методов их снижения;
- сравнение спектральных изменений точечных дефектов механически уплотненных и облученных образцов ГСС и выявление роли уплотнения стекла в изменении его показателя преломления под воздействием УФ облучения;
- исследование спектроскопических и радиационных свойств дефектов, вызванных наличием азота, его воздействия на дефекты ГСС.

#### Методы исследований

В диссертационной работе применялись следующие основные экспериментальные методы: спектроскопия оптического поглощения, люминесценции и электронного парамагнитного резонанса, измерение рассеяния, рентгеновский микроанализ.

#### Научная новизна

Выявлена специфика образования точечных и структурных дефектов в ОВС с сердцевинной из кварцевого стекла с высоким (более 18 мол %) содержанием  $\text{GeO}_2$ , вызывающих избыточные оптические потери (поглощение и рассеяние).

Показано, что добавка оксида фосфора повышает оптические потери в световодах с сердцевинной из высоколегированного ГСС. Предложена интерпретация образования стабильных центров окраски (ЦО) при совместном легировании кварцевого стекла фосфором и германием.

Обнаружено сильное влияние гидростатического уплотнения ГСС на спектроскопические свойства германиевых кислородно-дефицитных центров (ГКДЦ), проявляющееся в сдвиге и уширении полос поглощения и сильном тушении триплетной люминесценции. Из существующих гипотетических моделей ГКДЦ эффект сильного тушения совместим только с моделью бистабильной кислородной вакансии.

Показано, что азот усиливает фоторефрактивный эффект в ГСС, изготовленном методом MCVD. Предложены интерпретации влияния азота на ГКДЦ и фоторефрактивность ГСС.

### Практическая полезность

На основании результатов исследования предложены меры по снижению оптических потерь в ОВС с сердцевиной из высоколегированного ГСС, позволившие достичь рекордно низкого уровня потерь для MCVD метода.

Изготовлены ОВС с германосиликатной сердцевиной, осажденной методом MCVD и остеклованной в восстановительной атмосфере (в гелиевой и азотосодержащей), что увеличивает концентрацию ГКДЦ в стекле и его фоторефрактивность.

### Апробация работы.

Материалы, включенные в диссертацию, докладывались на международных и российских конференциях – “1-st International Symposium on Optical Fibre Sensing and Systems in Nuclear Environments” (1994, Моль, Бельгия), “Conference on Optical Fiber Communication” (1997, Даллас, США), “Высококачественные вещества и материалы для ИК-оптики” (1997, Нижний Новгород), “European Conference on Optical Communications” (1997, Эдинбург, Великобритания), “Conference on Optical Fiber Communication” (1998, Сан Хосе, Калифорния, США), “International School on Defects in SiO<sub>2</sub> and Related Dielectrics Science and Technology”(2000, Эриче, Италия), “Математические методы в технике и технологиях” (2000, С - Петербург).

По материалам диссертации опубликовано 17 работ

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 133 страницах, содержит 39 рисунков, 7 таблиц. Список литературы содержит 85 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и сформулированы основные цели исследования. Кратко изложено содержание материала по главам.

В первой главе, представляющей собой обзор литературы, рассматриваются применяемые в современной волоконной оптике легирующие добавки, методы синтеза стекла, природа оптических потерь в волоконных световодах, основные точечные дефекты и фоторефрактивный эффект в легированном кварцевом стекле.

Потери излучения, распространяющегося по ВС, обусловлены поглощением и рассеянием. В свою очередь они могут быть разделены на

собственные, определяемые фундаментальными механизмами, и избыточные, обусловленные несовершенством технологии изготовления световодов или внешними воздействиями

В настоящее время исследованы лишь некоторые причины, влияющие на рассеяние в ВС [2,3] Представляет интерес изучение влияния условий изготовления световодов на рассеяние, которое может являться одной из существенных причин потерь в ВС с большим содержанием германия

В ГСС преобладают точечные дефекты, создаваемые примесью германия В УФ спектрах доминируют полосы поглощения – интенсивная на 242 нм и менее интенсивная полоса в области 330 нм, связанные с ГКДЦ Их интенсивность растет при восстановительных условиях и при повышении температуры синтеза стекла В поглощение в ближней ИК области ГКДЦ не вносят значительного вклада. Однако после действия ионизирующих излучений в ГСС наблюдается наведенное поглощение, обусловленное распадом ГКДЦ и формированием ЦО, которые имеют оптическое поглощение как в УФ области, так и в более длинноволновом спектральном диапазоне [4].

Существует возможность образования ЦО в видимой и ИК областях в процессе изготовления световода [5,6]. Проблема избыточных потерь, наведенных при вытяжке, особенно актуальна для ОВС При повышении содержания германия создается больше как ГКДЦ, так и ловушек электронов, что приводит к увеличению количества стабильных ЦО в ВС. Представляет интерес детальное изучение влияния параметров вытяжки на избыточное поглощение с целью прояснения механизмов потерь и подбора оптимальных условий вытяжки, состава и геометрии высоколегированных, особенно одномодовых, световодов для уменьшения в них оптических потерь

В последнее время много внимания уделяется исследованию механизмов фоторефрактивного эффекта в ГСС, который используется при записи решеток показателя преломления УФ излучением [7,8]

В работе [9] было обнаружено уплотнение стекла в процессе записи РПП, которое по оценкам дает значительный вклад в изменение показателя преломления Однако роль дефектов в этом явлении не исследовалась Учитывая, что в процессе записи РПП в световодах из ГСС под действием УФ излучения происходит сильное преобразование германиевых дефектов, первой стадией которого является фотообесцвечивание ГКДЦ [4,10], представляется интересным провести исследование влияния уплотнения стекла под давлением на спектроскопические свойства ГКДЦ В диссертационной работе представлены результаты такого исследования

Недавно было показано, что дополнительное легирование ГСС азотом при изготовлении тонких пленок приводит к повышению его

фоточувствительности [11]. Для волоконной оптики азот является новой легирующей добавкой, которая также позволяет повысить фоточувствительность световодов. Для понимания механизмов увеличения фоторефрактивного эффекта при введении азота представлялось интересным провести спектроскопическое исследование дефектов кварцевого и ГСС с азотом под воздействием гамма и УФ облучений.

Вторая глава посвящена описанию техники эксперимента и использовавшихся в работе методов исследования. Исследовались световоды и объемные образцы стекол, вырезанные из световодных заготовок. Для их исследования в диссертационной работе применялись следующие основные экспериментальные методы: спектроскопия оптического поглощения, люминесценции и электронного парамагнитного резонанса, измерение рассеяния, рентгеновский микроанализ.

В третьей главе приведены результаты исследований оптических свойств световодов из высоколегированного ГСС, представлено исследование влияния параметров вытяжки на избыточное поглощение с целью прояснения механизмов избыточных потерь и подбора оптимальных условий вытяжки, состава и геометрии световодов. Предложены механизмы избыточных потерь и методы их снижения.

Предложено объяснение повышенных потерь в ОВС по сравнению с многомодовыми за счет разных индикатрисс рассеяния с учетом размеров неоднородностей.

Показано, что избыточные оптические потери в высоколегированных ОВС приблизительно равномерно распределены по всему объему сердцевин, а область границы сердцевин и оболочки не является определяющим источником избыточных потерь.

Подтверждено, что добавка фтора в сердцевину световода приводит к снижению потерь.

Экспериментально установлено, что оптические потери в световодах с германием в оболочке ниже, чем в световодах с примерно такой же концентрацией германия в сердцевине без германия в оболочке.

Экспериментально показано, что при высоком содержании  $\text{GeO}_2$  добавление 1%  $\text{P}_2\text{O}_5$  в сердцевину повышает потери на 1,5 - 2 дБ/км в диапазоне 1,3 - 1,7 мкм. Путем исключения примеси фосфора из стекла сердцевин и оболочки удалось снизить потери в MCVD-световодах с концентрацией  $\text{GeO}_2$  28 мол % до 1,8 дБ/км и показать перспективность бесфосфорных оболочек для световодов данного типа. Предложен механизм увеличения потерь при введении фосфора за счет образования фосфорных ЦО и стабилизации и роста концентрации германиевых ЦО.

Показано, что для стекла ОВС из высоколегированного ГСС поглощение в полосе 242 нм пропорционально концентрации Ge, несмотря на известный факт, что концентрация ГКДЦ сильно зависит от технологических условий. Поглощение на коротковолновом краю имеет сверхлинейную, близкую к квадратичной, зависимость от концентрации  $\text{GeO}_2$ . Можно предположить, что поглощение в этой области обусловлено комплексными кислородно-дефицитными центрами, т.е. дефектами, включающими два (или более) атома Ge.

Обнаружены микронеоднородности распределения  $\text{GeO}_2$  в сердцевине заготовок. Локальные отклонения от номинальной концентрации  $\text{GeO}_2$  оцениваются приблизительно в 7 мол % в заготовке без фтора и приблизительно в 2 мол % в заготовке со фтором. Очевидно, что такие неоднородности приводят к избыточному рассеянию.

Обобщая результаты этого исследования, отметим, что во всех вариантах технологии и структуры ОВС наблюдался излом в концентрационной зависимости потерь, который начинался при  $S \approx 16-18$  мол %  $\text{GeO}_2$  и особенно четко проявился для ОВС из преформ, полученных по стандартной технологии. На Рис 1. показана вилка значений потерь на длине волны 1,3 мкм. Наклон,  $S \cong \Delta\alpha/\Delta C$ , определяющий избыточные концентрационные

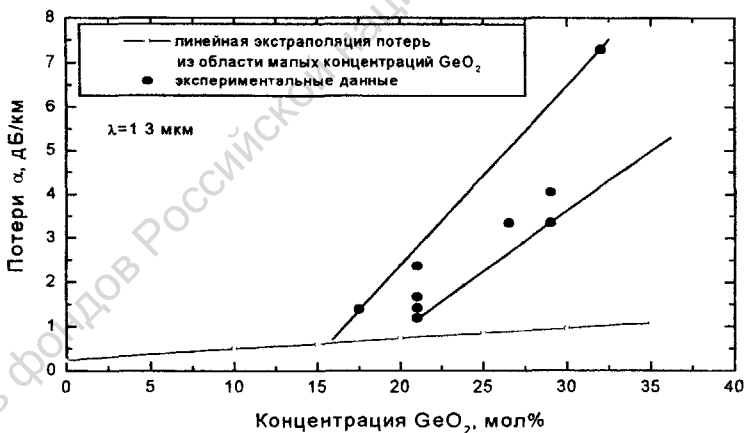


Рис 1. Зависимость потерь на длине волны 1,3 мкм от концентрации германия.



потери при  $C > 18$  мол % зависят от состава стекла оболочки и технологических условий. Вблизи верхнего предела потерь оказались ОВС, полученные по стандартной технологии. Нижний предел определяют лучшие результаты в сериях ОВС, полученные в ходе данной работы. Теоретический предел соответствует линейной экстраполяции из области малых концентраций. Наличие излома в концентрационной зависимости потерь при  $C > 16-18$  мол %  $\text{GeO}_2$  указывает на проявление нового механизма потерь, обусловленного большой концентрацией германия. Мы предполагаем, что этот механизм потерь связан с фазовым разделением стекла. Квазипороговый по концентрации характер потерь можно объяснить усилением разделения компонентов стекла, обусловленным зависимостью вязкости (и коэффициента диффузии) ГСС от концентрации германия.

С учетом результатов исследования предложены меры по снижению оптических потерь в световодах с сердцевинной из высоколегированного ГСС, позволившие снизить оптические потери в ОВС до рекордно низкого уровня для MCVD метода (Таблица 1).

Таблица 1. Параметры ОВС с наименьшими потерями

GeO <sub>2</sub> , мол. %	Оболочка	$\Delta n$	$\lambda$ , мкм	Потери, дБ/км	
				$\alpha$ (1.31 мкм)	$\alpha$ (1.55 мкм)
21	SiO <sub>2</sub> -F	0.030	1.15	1.2	0.73
29	SiO <sub>2</sub> -F	0.042	1.18	3.35	2.0
20	SiO <sub>2</sub> -GeO <sub>2</sub> -F	0.028	0.97	0.9	0.54
24.5	SiO <sub>2</sub> -GeO <sub>2</sub> -F	0.032	0.89	1.43	0.8

В четвертой главе приведены результаты исследований спектроскопических свойств ГСС, подвергнутых действию высокого механического давления, проведено сравнение с УФ-облученными стеклами с целью выяснения специфики фотоиндуцированного уплотнения стекла по сравнению с уплотнением под действием давления.

Гидростатическое сжатие образцов, изготовленных методами MCVD (концентрация  $\text{GeO}_2$  10 мол %) и VAD (концентрация  $\text{GeO}_2$  7 мол %) в смеси спиртов проводилось в Институте физики высоких давлений РАН при давлении 9 ГПа и температуре 300 °С в течение 15 мин. В результате сжатия образцов стекла были достигнуты остаточные изотропные уплотнения  $16 \pm 2\%$  (MCVD) и  $19 \pm 2\%$  (VAD).

Экспериментально показано, что хотя спектры поглощения после уплотнения (Рис 2) имеют внешнее сходство со спектрами, наведенными УФ облучением, в отличие от УФ облучения обработка стекла давлением не

приводит к образованию парамагнитных дефектов В процессе отжига наведенное сжатием поглощение постепенно уменьшалось и после отжига при 1000°C спектры поглощения, а также размеры и плотность образцов практически полностью возвращались к исходному состоянию. Время жизни синей (3.15 эВ) люминесценции (при возбуждении 3.68 эВ) после уплотнения несколько уменьшалось – с 107 мкс до 90 мкс. Интенсивность люминесценции 3.15 эВ после обжигания уменьшилась в 4 раза. При этом интенсивность полосы 4.25 эВ уменьшилась только в 1.5 раза.

Для объяснения наблюдаемых результатов привлечена модель, представляющая ГКДЦ как бистабильную нейтральную вакансию кислорода.

Обработка стекла высоким давлением расширяет методические возможности исследования природы дефектов и связанных с ними явлений. В

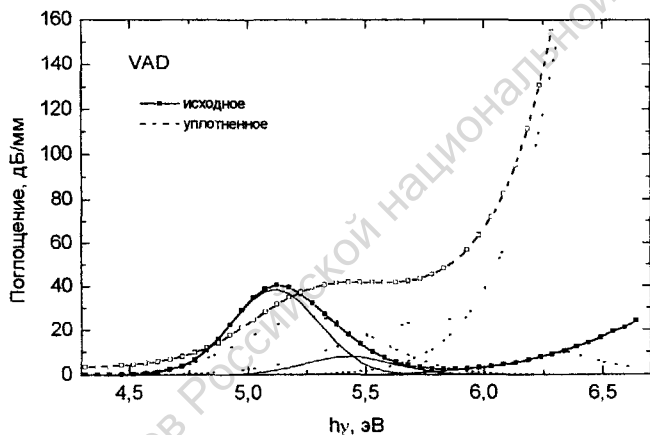


Рис 2 Спектры поглощения исходного и уплотненного  
стекла и их разложение на гауссовы компоненты

частности, увеличение неупорядоченности матрицы уплотненного ГСС может привести к увеличению его фоточувствительности, поскольку в этом случае, по-видимому, увеличивается как количество и разнообразие электронных ловушек и центров окраски, так и возможности перестройки структуры стекла вокруг УФ-возбужденного ГКДЦ.

В пятой главе приведены результаты исследований оптических и радиационно-оптических свойств германосиликатного и кварцевого стекол с азотом, полученных методами поверхностного плазмохимического осаждения из газовой фазы (SPCVD) и химического осаждения из газовой фазы (MCVD). Произведено сравнение фоторефрактивного эффекта в этих стеклах

Установлено, что интенсивность поглощения на 215 нм кварцевом стекле, легированном азотом, отчасти коррелирует с концентрацией хлора, в то время как интенсивность полос поглощения на 248 и 270 нм зависит от содержания азота и/или от дефицита кислорода. Отмечено, что полоса на 248 нм, приписываемая кремниевым кислородно-дефицитным центрам, в оксинитриде кремния на порядок более интенсивна по сравнению с чистым кварцевым стеклом. Экспериментально показано, что полоса поглощения с центром на 215 нм эффективно обесцвечивается как гамма, так и УФ облучением

Установлено, что в ГСС с азотом, изготовленном SPCVD методом,

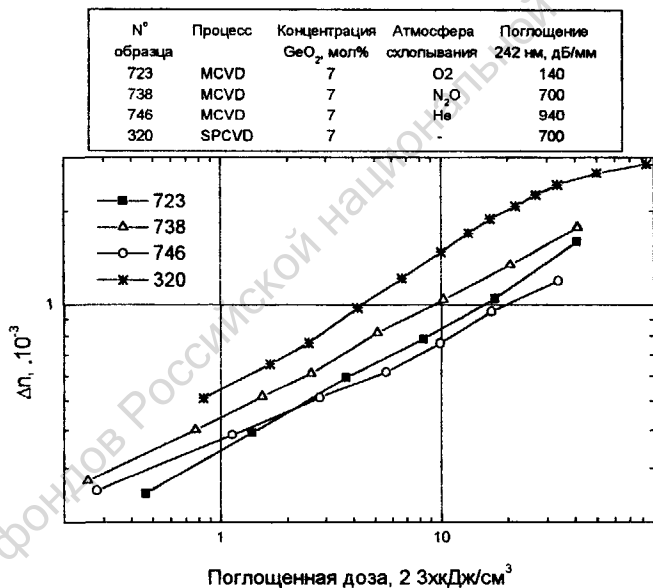


Рис 3 Зависимость изменения показателя преломления от поглощенной дозы в световодах с 7 мол%  $\text{GeO}_2$  в сердцевине

полосы на 210, 242 и 270 нм принадлежат трем различным дефектам. После УФ- или гамма-облучения этих стекол наблюдалось образование трех известных парамагнитных центров.  $\text{GeE}'$ ,  $\text{Ge}(1)$  и  $\text{Ge}(2)$ . Показано, что полоса поглощения на 270 нм чувствительна к УФ и  $\gamma$ -облучению. Ее обесцвечивание может составлять 25%.

Впервые исследованы заготовки и световоды с германосиликатной сердцевиной (7 мол.%  $\text{GeO}_2$ ), осажденной MCVD методом, а затем остеклованные и схлопнутые в азотной или гелиевой атмосфере. Остекловывание в восстановительной атмосфере приводит к существенному увеличению концентрации ГКДЦ в ГСС. Установлено, что фоторефрактивный эффект в таких световодах значительно выше, чем в световодах, изготовленных по стандартной MCVD технологии. Показано, что азот дополнительно увеличивает эффективность изменения показателя преломления под воздействием поглощенной ГКДЦ дозы УФ-излучения в ГСС (Рис 3). Предложены интерпретации влияния азота на ГКДЦ и фоторефрактивность ГСС.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1) Проведен анализ оптических потерь в одномодовых и маломодовых световодах с сердцевиной из высоколегированного германосиликатного стекла (более 15 мол.%  $\text{GeO}_2$ ), изготовленных по стандартной MCVD технологии. Избыточные потери, увеличивающиеся с ростом концентрации  $\text{GeO}_2$ , в одномодовых световодах составляют не менее 15 дБ/км на 155 мкм при концентрации  $\text{GeO}_2$  20 мол.% и в видимой и ближней ИК области определяются поглощением и рассеянием в сопоставимой степени.

Показано, что избыточные оптические потери в высоколегированных одномодовых волоконных световодах приблизительно равномерно распределены по всему объему сердцевины, а область границы сердцевины не является определяющим источником избыточных потерь.

Экспериментально показано, что добавка оксида фосфора повышает оптические потери в световодах с сердцевиной из высоколегированного германосиликатного стекла. Это повышение, по-видимому, обусловлено образованием фосфорных центров окраски, стабилизацией и увеличением концентрации германиевых ЦО.

2) Предложены меры по снижению оптических потерь в световодах с сердцевиной из высоколегированного германосиликатного стекла, позволившие снизить оптические потери в одномодовых волоконных

световодах до рекордно низкого уровня для MCVD метода – 0.54 дБ/км при 20 мол % и 0.8 дБ/км при 24.5 мол.% GeO<sub>2</sub> на длине волны 1.55 мкм.

3) Исследовано влияние гидростатического уплотнения германосиликатного стекла на его спектроскопические характеристики. Кроме значительного смещения и уширения полос поглощения исходных германиевых кислородно-дефицитных центров обнаружены новые дефекты с полосой поглощения около 7.3 эВ и снижение в 3-4 раза интенсивности синей люминесценции 3.15 эВ (390 нм). Предложена интерпретация этого явления в рамках модели бистабильной кислородной вакансии.

4) Показано, что в одномодовых волоконных световодах с германосиликатной сердцевиной, осажденной методом MCVD и остеклованной в восстановительной атмосфере (гелиевой и азотсодержащей), УФ-наведенное изменение показателя преломления коррелирует с концентрацией германиевых кислородно-дефицитных центров. Установлено, что азот дополнительно увеличивает эффективность изменения показателя преломления под воздействием поглощенной дозы УФ-излучения в германосиликатном стекле. Предложены возможные механизмы влияния азота на германиевые кислородно-дефицитные центры и фоторефрактивность германосиликатного стекла.

#### Список публикаций автора по теме диссертации

- 1 E M Dianov, K M Golant, R.R.Khrapko, V M.Mashinsky, V B Neustruev, O D Sazhin, A N Guryanov, D.D.Gusovsky and S I Miroshnichenko, Radiation resistance of optical fibres with fluorine-doped silica cladding. – 1st International Symposium on Optical Fibre Sensing and Systems in Nuclear Environments, 17-18 October 1994, Sunparks Rauwse Meren, Mol, Belgium, Programme and Technical Digest, p 25-26.
- 2 E M Dianov, V M Mashinsky, V B Neustruev, O.D Sazhin, A N Guryanov, V F Khopin, N N Vechkanov, S V Lavrishchev UV absorption and excess optical loss in preforms and fibers with high germanium content. – in Fiber Optic Materials and Components, Hakan H Yuce, Dilip K.Paul, Roger A Greenwell, Editors. Proc SPIE, vol 2290, pp 105-112, (24-29 July 1994, San Diego, CA, paper 15)
- 3 E.M.Dianov, V M.Mashinsky, V B Neustruev, O D Sazhin, A N Guryanov, V F.Khopin, N N Vechkanov, S V Lavrishchev, Origin of excess loss in single-mode optical fibers with high GeO<sub>2</sub>-doped silica core. – Optical Fiber Technology, vol. 3, 77-86, 1997.

4. О Н Егорова, В.М.Машинский, В.Б.Неуструев, О Д Сажин, Анализ оптических потерь в одномодовых световодах с высокой концентрацией германия в сердцевине. – в Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000: Сб трудов Международ науч. конф В 7-и т. (Санкт-Петербург, 27-29 июня 2000), том 7, с 48-51
- 5 О Д Сажин, Анализ и методы снижения оптических потерь в высоколегированных германосиликатных волоконных световодах. – Волоконно оптические технологии материалы и устройства Сборник трудов УНЦ Волоконных материалов и устройств, под ред. Е.М.Дианова, А А Makeева, N4, 2001, стр 66-72
6. E.M.Dianov, V.M.Mashinsky, V.B.Neustruev, O.D.Sazhin, V.V.Brazhkin, Spectroscopic study of densified germanosilicate glass. – in Conference on Optical Fiber Communication, Vol. 6, 1997 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D C , 1997), pp 3-4, (February 16-21, 1997, Dallas, Texas, paper TuB4).
- 7 E M Dianov, V.M.Mashinsky, V.B.Neustruev, O.D.Sazhin, V.V.Brazhkin, V A Sidorov, Optical absorption and luminescence of germanium oxygen-deficient centers in densified germanosilicate glass – Optics Letters, vol. 22, no 14, 1089-1091, 1997.
8. E.M.Dianov, V.M.Mashinsky, V.B.Neustruev, O.D.Sazhin, V.A.Sidorov, Rise and decay of 3.15 eV luminescence in germanosilicate glass: influence of glass densification – in Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Fibers and Waveguides. Applications and Fundamentals, vol. 17, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington DC, 1997) pp. 172-174
9. Е М Дианов, В.В.Колташев, В.М.Машинский, В.Б.Неуструев, В.Г.Плотниченко, О Д Сажин, В.А.Сидоров, Влияние УФ облучения и обработки высоким давлением на спектры УФ поглощения и комбинационного рассеяния германосиликатного стекла – Квантовая электроника, том 25, № 2, 103-104, 1998.
- 10 E M Dianov, V.M.Mashinsky, V.B.Neustruev, O.D.Sazhin, V.A.Sidorov, Mechanism of excitation and quenching of 3.15-eV luminescence in germanosilicate glass – in Advances in Fiber Optics, Eugeny M.Dianov, Editor, Proceedings of SPIE, vol. 4083, pp. 153-158, 2000.
- 11 Dianov, K.M. Golant, R R Khrapko, V.M. Mashinsky, O I Medvedkov, I V Nikolin, O.D Sazhin, S.A.Vasiliev, UV absorption and luminescence in bulk nitrogen-doped germanosilicate glass prepared by SPCVD – in Proc 11th

- IOOC/23rd ECOC'97, vol 2, p 123-126 (22-25 September 1997, Edinburgh, UK) Published by Institution of Electrical Engineers, London
12. E M Dianov, K M Golant, V M Mashinsky, O I Medvedkov, I V Nikolin, O D Sazhin, S A Vasiliev, Highly photosensitive nitrogen-doped germanosilicate fibre for index grating writing – Electronics Letters, vol 33, no 15, 1334-1336, 1997 (17th July)
  13. E M Dianov, K M Golant, V M Mashinsky, O I Medvedkov, I V Nikolin, O D Sazhin, S A Vasiliev, Highly photosensitive germanosilicate fibre codoped with nitrogen – in Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Fibers and Waveguides Applications and Fundamentals, vol 17, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington DC, 1997) pp 153-155.
  14. E M Dianov, A N Guryanov, V F Khopin, V M Mashinsky, O I Medvedkov, O D Sazhin, S A Vasiliev, N N Vechkanov, Yu P Yatsenko, Photorefractive effect and photoinduced  $\chi^{(2)}$  grating formation in germanosilicate core fibers codoped with nitrogen in MCVD process – in Advances in Fiber Optics, Eugeny M Dianov, Editor, Proceedings of SPIE, vol 4083. pp 144-152, 2000
  15. Е.М.Дианов, А.Н.Гурьянов, В.Ф.Хопин, В.М.Машинский, О.Д.Сажин, Н.Н.Вечканов, Ю.П.Яценко, Фотоиндуцированная квадратичная нелинейная восприимчивость в германосиликатных световодах, приготовленных в восстановительной атмосфере азота и гелия в MCVD-процессе – XI Конференция по химии высокочистых веществ, 15-18 мая 2000, Нижний Новгород, Тезисы докладов, с. 274-275
  16. С.А.Васильев, Н.Н.Вечканов, Е.М.Дианов, А.Н.Гурьянов, В.М.Машинский, О.И.Медведков, О.Д.Сажин, В.Ф.Хопин, Ю.П.Яценко, Фоторефрактивный эффект и фотоиндуцированная квадратичная нелинейная восприимчивость в германосиликатных световодах, приготовленных в атмосферах азота и гелия в MCVD процессе. – Квантовая электроника, т 30, №9, 815-820, 2000.
  17. E.M.Dianov, A N Guryanov, V F Khopin, V M Mashinsky, O I Medvedkov, O.D Sazhin, S A Vasiliev, N N Vechkanov, Yu.P Yatsenko, Photoinduced refractive index change and second harmonic generation in MCVD germanosilicate core fibers fabricated in reduced (nitrogen and helium) atmospheres – in Defects in SiO<sub>2</sub> and Related Materials Science and Technology, G Pacchioni, L Skuja and D Griscom, Editors, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2000, pp 515-527

Список цитируемой литературы

- [1] Sudo S, Itoh H., Efficient non-linear optical fibres and their applications. – Optical and Quantum Electronics, 22, 1990, p. 187-212.
- [2] Stone F T, Taryal B K, Loss reduction in optical fibers – J. Non-Cryst Solids, 42, 1980, p 247-260.
- [3] Shibata N, Kawachi M., Edahiro T., Optical-loss characteristics of high GeO<sub>2</sub> content silica fibers. - The Transactions of the IECE of Japan, V. E 63, N.12, December 1980, p.837-841.
- [4] Neustruev V.B., Dianov E.M., Kim V.M., Mashinsky V.M, Romanov M V, Guryanov A N., Khopin V F., Tikhomirov V.A, Ultraviolet radiation - and radiation-induced color centers in germanium-doped silica glass and fibers.– Fiber and Integrated Optics, 1989, V.8, N°.2, p. 143-156.
- [5] Ainslie B J, Beales K.J., Day C.R and Rush J D., Interplay of design parameters and fabrication conditions on the performance of monomode fibers made by MCVD.– IEEE J. Quantum Electronics, 1981, V. QE-17, p. 854-857.
- [6] Ainslie B.J., Beales K.J., Cooper D M, Day C R. and Rush J D , Drawing-dependent losses in dispersion-shifted monomode fibers – Proc. Optical Fiber Communications, 1982, p 66-67.
- [7] D P Hand and P St.J.Russell, Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers, Optics Lett , 15(2), 102-104, 1990.
- [8] D.Wong, S.B Poole and M.G.Sceats, Stress relief: proof of the mechanism of photo-induced change, Proc Integrated Photonics Research, New Orleans. Louisiana. 1992, Postdeadline papers, pp.56-60
- [9] B.Poumellec, P Guenot, I.Riant, P.Sansonetti, P Niay, P.Bernage, J.F.Bayon, "UV induced densification during Bragg grating inscription in Ge:SiO<sub>2</sub> preforms", Optical Materials, 4, 441-9 (1995)
- [10] C Fiori and R A B Devine, "Ultraviolet irradiation induced compaction and photoetching in amorphous thermal SiO<sub>2</sub>", Mat Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 61, p. 187 (1986).
- [11] C V Poulsen, T.Storgaard-Larsen, J.Hubner and O.Leistico, in Photosensitive Optical Materials and Devices, M P Andrews, Editor, SPIE 2998, p. 132 (1997)

Подписано в печать 19 марта 2002 г.  
Формат 60x84/16. Заказ № 27. Тираж 80 экз. П.л. I, 0

Отпечатано в РИИС ФИАН.

Москва, В-333, Ленинский проспект, 53