

# О механизме индуцированного изменения показателя преломления в фосфоросиликатном стекле

Ю.В.Ларионов, В.О.Соколов, В.Г.Плотниченко

*Обнаружен необычный характер индуцированного роста показателя преломления (ПП) и его термического разрушения в фосфоросиликатном волоконном световоде при записи и отжиге в нем брэгговских решеток. Характер изменений ПП объяснен с помощью новой модели фотоиндуцированного процесса перестройки сетки стекла. В модели предполагается возможность образования вблизи точечных дефектов стекла фотоиндуцированных разрежений сетки – «нанопор» – и их перемещения по сетке за счет переключения межатомных связей в условиях, когда сетка становится «мягкой». Фотоиндуцированные изменения плотности сетки приводят к изменению ПП.*

**Ключевые слова:** фоточувствительность, фосфоросиликатное стекло, фотоиндуцированное изменение показателя преломления, нанопора.

## 1. Введение

Явление фоточувствительности в легированных силикатных стеклах под действием УФ излучения давно используется для записи брэгговских решеток (БР). Фундаментальные исследования механизма фоточувствительности в германосиликатных стеклах (ГСС), наиболее часто используемых для формирования сердцевины световодов, продолжаются уже более четверти века и все еще не завершены. Исследования же фоточувствительности фосфоросиликатного стекла (ФСС), перспективного для создания волоконно-оптических ВКР-лазеров и усилителей, начаты лишь немногим более 10 лет назад. Наибольший интерес ученых вызывает насыщенное молекулярным водородом ФСС, в котором можно изменить ПП на  $(2-3) \times 10^{-3}$ , что достаточно для формирования высокоотражательной БР. В настоящей работе мы ограничились исследованием ФСС без насыщения водородом, полагая, что понимание причин его фоточувствительности позволит объяснить более сложный механизм этого явления в насыщенных водородом образцах.

Фоточувствительность в большинстве силикатных стекол объясняют аддитивным вкладом двух основных микроскопических механизмов [1]. Считается, что основной вклад в изменение ПП вносит фотоиндуцированная модификация точечных дефектов. В экспонированной области стекла происходит разрушение исходных точечных дефектов и рождение дефектов с другой поляризуемостью, что приводит к изменению ПП. В ГСС  $\sim 90\%$  наведенного ПП (НПП) определяется этим механизмом [1]. В основе второго механизма лежит перестройка сетки стекла в ходе экспонирования, вызывающая, как правило,

ее уплотнение и ведущая к росту ПП. В чистом кварцевом стекле, в котором роль этого механизма признается определяющей, плотность предположительно увеличивается из-за уменьшения размеров междуузлий кольцевых структур, объединяющих вершины тетраэдров  $\text{SiO}_4$  [2] (в дальнейшем – кольцевых междуузлий). Уплотнение сетки происходит благодаря ее релаксации в ходе экспонирования, поскольку изначально она находится в неравновесном состоянии вследствие быстрого остывания стекла при его изготовлении. Значение НПП в кварцевом стекле, определяемое этим механизмом, на 1–2 порядка меньше, чем в легированных силикатных стеклах [3]. В последних перестройка сетки также происходит, что и вызывает изменение плотности, возрастающей с увеличением уровня легирования [4]. Однако и в этом случае перестройка сетки вносит лишь дополняющий вклад в НПП. Перестройка сетки ГСС в ходе экспонирования наблюдалась в [5] методом комбинационного рассеяния.

Проявления фоточувствительности в ФСС и в ГСС [6] существенно различаются. Причиной этого может быть то, что в ФСС связи атомов фосфора с окружающими их атомами под действием УФ излучения изменяются (в отличие, например, от атомов германия в ГСС). Так, было обнаружено [6] изменение координационного числа атомов фосфора – их переход в ходе экспонирования из пятикоординированного состояния в трехкоординированное и обратно.

Такое изменение слабо отражается на поляризуемости атома фосфора (а следовательно, на изменении ПП в рамках механизма модификации точечных дефектов), но способно вызвать перестройку кольцевых структур сетки и, как следствие, изменение ПП благодаря перестройке сетки. Возможно, по этой причине НПП в ФСС меньше, чем в других силикатных стеклах (при сходных условиях экспонирования) [3], и близок к его значению в кварцевом стекле ( $\Delta n \sim 5 \times 10^{-5}$ ). Немонотонное изменение координационного числа фосфора в сетке ФСС и соответствующая ее перестройка способны, по-видимому, объяснить необычный квазипериодический характер дозной зависимости концентрации точечных дефектов и межатомных

Ю.В.Ларионов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: luv@fo.gpi.ru  
В.О.Соколов, В.Г.Плотниченко. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: victor@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 30 марта 2009 г. После доработки – 11 февраля 2010 г.

связей сетки [7, 8]. Необычный вид дозной зависимости наведенной плотности материала в ФСС, напоминающей квазиступенчатую функцию [4], также может быть обусловлен перестройкой сетки. Кроме различий в наведении ПП для ФСС и ГСС, существуют различия и в характере его термического разрушения. Они свидетельствуют о том, что НПП в волоконных световодах на основе ФСС возникает не только в освещенных участках БР, но и между ними, что сложно объяснить модификацией точечных дефектов лишь в освещенных участках стекла [9]. Однако механизм фоточувствительности, объясняющий особенности всех ее проявлений в ФСС изменениями сетки, в настоящее время не известен.

Препятствием к объяснению фоточувствительности ФСС с помощью механизма модификации точечных дефектов до недавнего времени было отсутствие в спектре поглощения этого стекла достаточно глубоких полос поглощения. Обнаружение нового точечного дефекта с полосой поглощения в ВУФ участке спектра [10] потенциально устраняет это препятствие. Однако существование указанного дефекта не позволяет объяснить результаты экспериментов по наведению и разрушению ПП в ФСС, полученные в данной работе. Эти результаты подтолкнули нас к объяснению, основывающемуся на механизме перестройки сетки стекла.

## 2. Условия проведения экспериментов

В качестве объектов исследования мы использовали волоконные и объемные образцы. Волоконные образцы были вытянуты из заготовок ФСС с низкими потерями, полученных MCVD-методом. Из этих заготовок были вырезаны и объемные образцы. Основные параметры волоконного световода: разность ПП сердцевины и оболочки  $\Delta N = 0.01$ , длина волны отсечки  $\lambda_c = 1.1$  мкм, концентрация  $P_2O_5$   $C_{P_2O_5} = 12$  мол. %.

Экспонирование образцов проводилось эксимерным лазером CL5000 на длине волны 193 нм (длительность импульса составляла 6–7 нс, плотность энергии в импульсе 25–200 мДж/см<sup>2</sup>, частота следования импульсов 10 Гц, иногда 5–50 Гц). Использование лазера CL5000 позволило примерно в 15 раз увеличить значение НПП в ФСС по сравнению с достигнутым в [6], где применялся лазер CL7000 с длительностью импульса 20 нс. Это дало возможность записывать БР в волоконных световодах без насыщения их водородом. Запись БР производилась посредством освещения их через фазовую маску. Разрушение НПП происходило при термическом отжиге участков световодов с записанными БР. Прецизионная автоматизированная установка для проведения отжига и методика измерений разрушаемого НПП описаны в [11].

Измерения ПП в световодах в ходе его наведения и разрушения производились с помощью спектрофотометра по изменению параметров брэгговских пиков – их глубины и спектрального смещения. Измерение этих параметров позволило рассчитать два значения НПП: модулированное ( $\Delta n_{mod}$ ), определяемое как разность между ПП в экспонированных и неэкспонированных частях штрихов БР, и усредненное по длине решетки ( $\Delta n_{av}$ ).

Спектры поглощения ФСС в ходе экспонирования исследовались на объемных образцах с помощью ИК фурье-спектрометра Bruker IFS-113V. Спектры измерялись до экспонирования образцов, а затем после каждого акта экспонирования.

## 3. Результаты экспериментов

*Измерение НПП в ФСС.* На рис. 1,а приведены дозные зависимости  $\Delta n_{av}$ , полученные при различных плотностях излучения и частотах экспонирования световодов (кривые 1–4). Указанные зависимости отобраны как характерные из большого числа полученных зависимостей (около 30) для демонстрации особенностей наведения ПП в световодах такого типа. Важной особенностью представленных кривых является наличие локальных отклонений от аппроксимирующих эти зависимости «гладких» кривых. «Гладкие» дозные зависимости, получаемые обычно при записи БР в насыщенном водородом ФСС, представлены для сравнения на рис. 1,б (диапазоны изменения НПП на обоих рисунках примерно совпадают). Погрешности измерения НПП с помощью спектрофотометра, связанные с нестабильностью положения максимумов брэгговских пиков из-за шумов интенсивности света, проходящего через БР, не превышают  $1 \times 10^{-5}$ . «Гладкость» кривых на рис. 1,б свидетельствует также и о малой вероятности возникновения заметной случайной погрешности при определении дозы облучения в ходе роста БР (шаг в приросте дозы  $D$  на рис. 1,а составил 100 Дж/см<sup>2</sup>). Поэтому отклонения от гладкости кривых на рис. 1,а могут быть обусловлены только процессами в самом образце. Отклонения особенно отчетливо заметны для кривых 1–3 и заключаются в локальном (т.е. происходящем в относительно небольшом диапазоне изменения дозы) увеличении или уменьшении наклона кривых при относительно неизменной скорости роста за пределами этого участка. Благодаря этому один из участков кривой способен сдвигаться по отношению к соседнему. Замедление роста наблюдается в нескольких последовательно

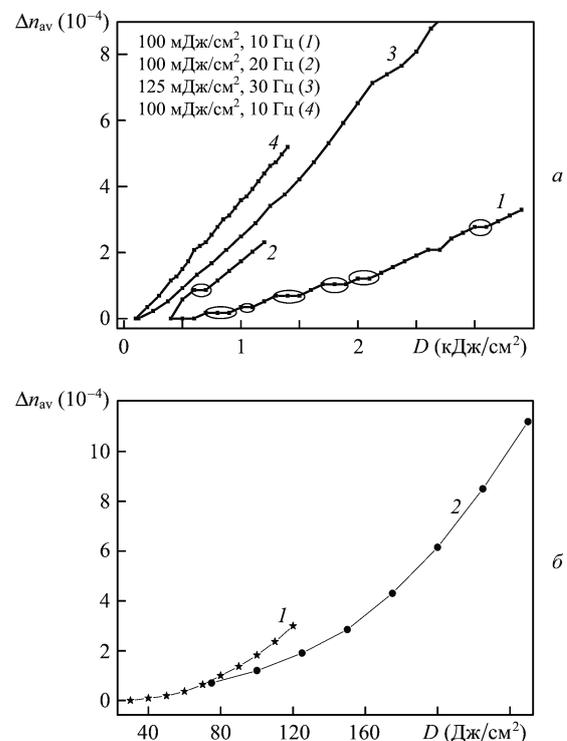


Рис. 1. Сопоставление дозных зависимостей среднего НПП в ФСС при различных плотностях энергии и частотах экспонирования для образца без водорода, локальные отклонения обведены эллипсами (а), и для образца, насыщенного водородом, в диапазонах изменения дозы 30–120 (1) и 80–250 Дж/см<sup>2</sup> (2) (б).

расположенных участках кривых (т. е. оно не может быть связано с ошибкой измерений НПП в одной или нескольких точках). Локальные отклонения хода кривой могут наблюдаться при нескольких последовательных значениях дозы (на кривых 1 и 2 они обведены эллипсами). Таким образом, подтверждается возможность квазиступенчатого роста НПП, обнаруженная в [6] при экспонировании ФСС гомогенным пучком. При более быстром росте  $\Delta n_{av}$  (кривая 4) локальные замедления роста становятся менее выраженными, однако они все же существуют, хотя характер замедления роста меняется.

Еще одной особенностью формирования БР в ФСС является низкая воспроизводимость процесса ее записи. Из сравнения кривых 1 и 4 на рис.1,а следует, что при неизменных условиях экспонирования значения  $\Delta n_{av}$  различаются максимально в  $\sim 5$  раз (средний разброс  $\Delta n_{av}$ , полученный в экспериментах, составляет примерно 2 раза). По нашим данным, в волоконном световоде Flexcore (ГСС) при сходных условиях записи БР разброс роста  $\Delta n_{av}$  составляет в среднем лишь  $\sim 50\%$ . Таким образом, изменения эффективности записи БР в ФСС определяются не только невоспроизводимостью условий экспонирования, но и материалом волокна. Причиной повышенной невоспроизводимости записи БР в ФСС может быть высокая чувствительность НПП к плотности энергии импульса излучения. Так, БР невозможно записать при плотности энергии 50 мДж/см<sup>2</sup>. С увеличением плотности вероятность записи возрастает, и при ее значении выше 125 мДж/см<sup>2</sup> БР записываются во всех случаях. Однако зависимость скорости роста НПП от плотности излучения определяется также случайным законом (так, скорость роста кривой 4 на рис.1,а больше, чем кривой 3, для которой плотность энергии выше). Такой разброс определяется не только нестабильностью энергии импульсов лазера во время экспонирования (в этом случае заметно менялся бы наклон кривых в ходе экспонирования), но и различием свойств отдельных участков самого волокна. Чувствительность записи БР к плотности излучения свидетельствует о включенности в этот процесс двухфотонного поглощения света. Это означает, что за наведение ПП могут быть ответственны точечные дефекты, поглотившие кванты с энергией более 6.4 эВ (193 нм) и/или модификация сетки [8].

*Измерение наведенного поглощения.* В [7] было установлено, что наибольшее значение наведенного поглощения в ФСС в УФ диапазоне имеет место в полосе вблизи 6.9 эВ ( $\lambda \sim 180$  нм). Оно почти в четыре раза превышает его значение в полосе около 5 эВ, следующей по интенсивности за полосой 6.9 эВ. Поэтому наведенное поглощение в указанной полосе должно в соответствии с соотношением Крамерса – Кронига влиять определяющим образом на НПП. Указанную связь наведенного поглощения и НПП можно выявить экспериментально по корреляции соответствующих дозных зависимостей. На рис.2 показаны дозные зависимости наведенного поглощения в полосе 6.9 эВ при плотностях экспонирования объемных образцов ФСС 50 и 100 мДж/см<sup>2</sup>. Видно, что при плотности 100 мДж/см<sup>2</sup>, при которой начинается рост НПП, с ростом дозы экспонирования происходит уменьшение исходного поглощения в выбранной полосе. Такое поведение противоречит монотонному росту ПП в ФСС (рис.1,а). Уменьшение наведенного поглощения в полосе 6.9 эВ с дозой излучения в ненасыщенном водородом ФСС зафиксировано также в [14]. При плотности излучения

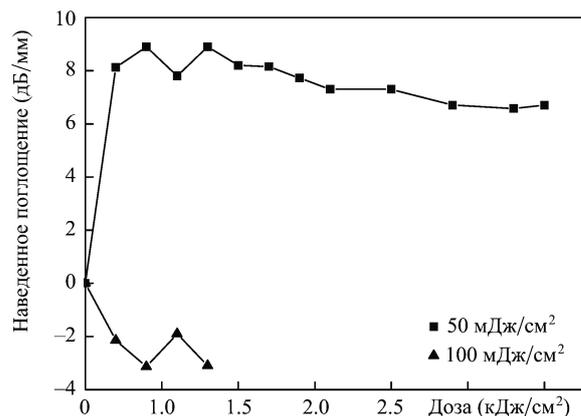


Рис.2. Дозные зависимости наведенного поглощения в полосе 6.9 эВ при плотностях экспонирования объемных образцов ФСС 50 и 100 мДж/см<sup>2</sup>.

50 мДж/см<sup>2</sup>, при которой НПП отсутствует, дозная зависимость наведенного поглощения (рис.2) заметно изменяется, однако и в этом случае в большей части диапазона доз экспонирования поглощение в полосе уменьшается.

*Оценка термического разрушения НПП в ФСС.* В ходе термического разрушения БР, записанной в насыщенном водородом световоде на основе ФСС, НПП изменяется неожиданным образом: его модулированная часть ( $\Delta n_{mod}$ ) уменьшается, а среднее значение ( $\Delta n_{av}$ ) остается почти неизменным [13]. Для объяснения этого авторы [13] предположили, что в ходе отжига происходит перестройка сетки стекла в области экспонирования, в результате чего слегка увеличивается период решетки или ПП стекла.

В настоящей работе (как и в [13]) зависимость  $\Delta n_{mod}(T)$  определялась в ходе отжига по разности амплитуд брэгговских пиков при заданной и исходной температурах, а для определения  $\Delta n_{av}(T)$  отжиг БР проводился два раза. В результате первого отжига решетка разрушалась не полностью, что позволяло провести ее отжиг второй и даже третий раз в том же диапазоне изменения температуры. Поскольку в ходе последующих отжигов дополнительного разрушения  $\Delta n_{mod}$  практически не происходит, то изменение спектрального положения брэгговского пика  $\Delta\lambda$  в первом и последующем отжигах при соответствующей температуре должно определять зависимость  $\Delta n_{av}(T)$ :

$$\Delta n_{av} = \frac{n_{av}\Delta\lambda}{\eta\lambda}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – доля излучения, распространяющегося в сердцевине световода.

В результате проведения серии экспериментов обнаружилось, что и в насыщенном водородом ФСС  $\Delta n_{av}$  и  $\Delta n_{mod}$  относительно независимы. Так, для одной из БР в результате экспонирования были достигнуты  $\Delta n_{mod} = 4.2 \times 10^{-4}$  и  $\Delta n_{av} = 2.3 \times 10^{-4}$ ; после отжига  $\Delta n_{mod} = 2.3 \times 10^{-4}$ , а уменьшение  $\Delta n_{av}$  составило  $4.7 \times 10^{-4}$ . Таким образом, уменьшение  $\Delta n_{av}$  в результате отжига превысило наведенное значение, что свидетельствует об изменениях исходного состояния сетки. В другом эксперименте БР отжигалась три раза. На рис.3,а показаны температурные зависимости положения брэгговского пика в ходе первого, второго и третьего отжигов (кривые 1, 2, 3 соответственно), а на рис.3,б – соответствующие значения  $\Delta n_{mod}$  (кривая 1) и  $\Delta n_{av}$  в ходе второго и третьего

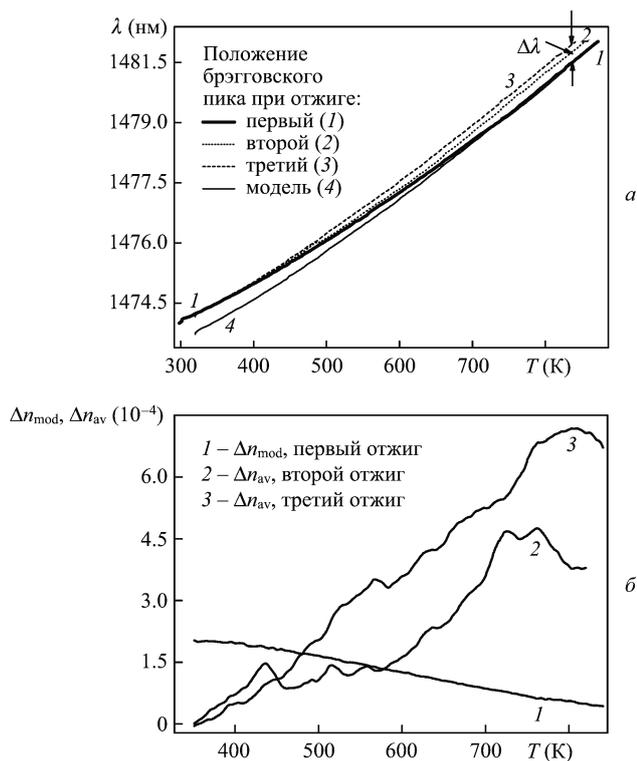


Рис. 3. Температурные зависимости положения брэгговского пика в ходе первого (1), второго (2) и третьего (3) отжига (а) и зависимости  $\Delta n_{mod}(T)$  (1) и  $\Delta n_{av}(T)$  в ходе второго (2) и третьего (3) отжига.

отжига (кривые 2 и 3). Монотонный рост кривых на рис.3,а обусловлен температурными изменениями периода БР и ПП стекла, а зависимость  $\Delta n_{av}(T)$  на рис.3,б определяется смещением кривых 2, 3 относительно кривой 1 в соответствии с (1).

Видно, что в результате отжига  $\Delta n_{mod}$  уменьшается (рис.3,б, кривая 1), а  $\Delta n_{av}$  после второго и третьего отжигов растет. Это объясняется ростом брэгговского пика с температурой (ср. кривые 2, 3 на рис. 3,б с кривой 1 на рис.3,а). Дополнительным подтверждением относительной независимости  $\Delta n_{av}$  и  $\Delta n_{mod}$  является различие кривых  $\Delta n_{av}(T)$  в ходе второго и третьего отжигов (рис.3,б) при постоянном  $\Delta n_{mod}$ . Независимость  $\Delta n_{av}$  и  $\Delta n_{mod}$  трудно объяснить в рамках механизма точечных дефектов.

Мы предполагаем, что в ходе отжига вместе с разрушением  $\Delta n_{mod}$  и уменьшением части  $\Delta n_{av}$  в световоде происходит деформация сетки, вызывающая увеличение исходного периода БР или/и исходного ПП сердцевины световода. По-видимому, деформация сетки в ходе отжига возникает в результате предварительного экспонирования ее УФ излучением. В отсутствие деформации температурная зависимость положения брэгговского пика после отжига определялась бы кривой, находящейся вблизи модельной кривой 4 на рис.3,а, которая смещена относительно кривой 3 вниз на  $\Delta\lambda$ . Значение  $\Delta\lambda$  определяется пересечением кривых 1 и 4 при температуре около 900 К. В модельном случае зависимости  $\Delta n_{av}(T)$  и  $\Delta n_{mod}(T)$  на рис.3,б уменьшались бы коррелированно. Предположительно в результате деформации сетки происходит смещение кривой 4 на  $\Delta\lambda$  до совпадения с кривой 3 и, соответственно, смещение диапазона изменения кривой  $\Delta n_{av}(T)$  на рис.3,б, такое, что  $\Delta n_{av}(293\text{ °C})$  становится близким к нулю, а  $\Delta n_{av}(T)$  в ходе отжига увеличивается.

#### 4. Объяснение обнаруженных проявлений фоточувствительности ФСС

Для объяснения описанных выше необычных явлений, возникающих при наведении и разрушении ПП в ФСС, необходимо создать новую, более сложную модель фотоиндуцированных изменений стекла, причем эта модель, по-видимому, не может основываться на модификации поляризуемости точечных дефектов. Представляется, что в основе объяснения квазиступенчатого роста НПП может лежать квазипериодическое фотоиндуцированное изменение жесткости сетки ФСС [8].

В основе предлагаемой модели лежит представление о фотоиндуцированном изменении кольцевых междуузлий сетки, использованное для объяснения фоточувствительности кварцевого стекла (см. Введение). Источником дефектов сетки (увеличенных или уменьшенных размеров междуузлий) предположительно являются исходные точечные дефекты – предложенные в [10] фосфорные кислородно-дефицитные центры (ФКДЦ), концентрация которых зависит от уровня легирования стекла. При их фотовозбуждении и последующей релаксации атом кремния в ФКДЦ перемещается по направлению от центра так, что на месте последнего образуется локальное разрежение (подобно тому, как это происходит в кварцевом стекле для КДЦ в аномальном состоянии [14]). При этом в непосредственной близости от ФКДЦ в результате уменьшения ближайшего кольцевого междуузлия образуется локальное уплотнение, а по соседству с ним – кольцевое междуузлие большего размера. Такое междуузлие в дальнейшем мы будем называть «нанопорой». Предполагается, что нанопоры способны перемещаться по сетке за счет переключения межатомных связей, которые их ограничивают, и это подтверждают результаты работы [15].

Переключение начинается с образования разрывов межатомных связей между парами атомов около нанопоры в ходе экспонирования. В условиях «мягкой» сетки [8] возможно их восстановление между другими парами атомов. Межатомные связи вокруг нанопоры могут переключаться многократно, в результате чего она способна перемещаться по сетке, дробясь или увеличиваясь, в том числе и при объединении с другой нанопорой. Поскольку нанопоры ограничены большим количеством межатомных связей, чем локальные уплотнения, то и вероятность переключения связей (и, следовательно, скорость перемещения) для них выше. В результате беспорядочного перемещения нанопоры способны накапливаться в частях сетки вблизи границ освещенных участков, поскольку их движение за пределами этих участков ограничено жесткой сеткой стекла. В итоге происходит увеличение средней плотности в освещенных местах сетки и уменьшение ее в смежных областях, что и приводит к соответствующему изменению ПП в этих местах.

В освещенных участках состояние «мягкой» сетки ФСС в ходе экспонирования периодически сменяется «жестким» [8], в результате чего процесс перемещения нанопор приостанавливается. Этим можно объяснить локальные замедления скорости роста ПП на рис.1,а для приведенных там дозных зависимостей (кривые 1 и 2). (Эти замедления сложно объяснить случайным изменением плотности излучения лазера вследствие двухфотонного поглощения света, поскольку они существуют и при относительно большой плотности излучения (см. рис.1,а, кривая 3).) На зарождение и перемещение нанопор в сетке

стекла должны влиять механические напряжения в волоконном световоде. Вариация последних вдоль его сердцевины способна приводить к изменению скорости перемещения нанопор на различных его участках и, соответственно, к невоспроизводимости роста в них НПП. Это предположение позволяет объяснить плохую воспроизводимость записи БР в ФСС по сравнению с ГСС, где наведение ПП определяется преимущественно модификацией точечных дефектов.

Перемещение нанопор в освещенном участке сердцевины волоконного световода должно происходить во всех направлениях, в том числе и под углом к границе сердцевины – оболочки. В освещенной части оболочки сетка кварцевого стекла переходит в «мягкое» состояние в результате накопления разрывов мостиков Si–O–Si. Нанопоры в кварцевом стекле не возникают из-за меньшей концентрации исходных точечных дефектов, поэтому изменение его плотности в результате экспонирования меньше, чем у ФСС [4]. Нанопоры, мигрировавшие к границе сердцевины – оболочки из ФСС, способны перейти ее и продолжить перемещение внутри «мягкого» участка кварцевого стекла, уменьшая его плотность и увеличивая среднее значение плотности в ФСС. Из-за этого в процессе записи БР нарушается соотношение между  $\Delta n_{av}$  и  $\Delta n_{mod}$ . На него может влиять изменение механических напряжений вдоль оси волокна в ходе записи БР. При отжиге БР перемещенные нанопоры возвращаются в исходные положения. Однако нанопоры из освещенных областей оболочки не могут возвратиться на исходные позиции из-за большей по сравнению с сеткой ФСС жесткости сетки кварцевого стекла в отсутствие освещения. Поэтому среднее значение НПП в сердцевине ФСС после отжига остается большим, чем было в исходном состоянии до записи БР, что приводит к увеличению длины волны брэгговского пика (рис.3,а, кривые 2, 3).

Предложенная модель образования локальных неоднородностей плотности стекла под действием УФ излучения не является совершенно новой. В [16] для объяснения фоточувствительности использована модель, в основе которой лежит предположение о зарождении и росте микропор в местах локализации механических напряжений, возникающих в момент экспонирования волокна мощным импульсным лазером. В отличие от модели [16], мы предполагаем, что нанопоры в виде кольцевых междоузлий в ФСС имеют намного меньший размер и подвижны в «мягком» ФСС. Это позволяет обосновать и пространственное разделение участков стекла с большей и меньшей плотностью, и отсутствие высоких потерь на рассеяние. Предложенная модель позволяет также объяснить увеличение плотности экспонируемого ФСС от степени легирования, обнаруженное в [4].

## 5. Заключение

Были записаны брэгговские решетки в ненасыщенных водородом волоконных световодах на основе ФСС, что позволило изучить особенности наведения ПП и его разрушения в процессе отжига БР. Важной особенностью наведения ПП оказался вид дозной зависимости с локаль-

ными отклонениями от хода «гладких» кривых. Особенностью изменения НПП в ходе термического отжига является уменьшение до нуля его модулируемой компоненты при слабом уменьшении среднего значения.

Необычный характер проявления фоточувствительности в ФСС позволил предложить более сложную модель фотоиндуцированных процессов в этом материале. В ее основе лежит фотоиндуцированное изменение сетки стекла. Однако, в отличие от представления о перестройке сетки по типу кварцевого стекла, мы предположили, что в сетке образуются дефекты в виде как увеличенных, так и уменьшенных по размеру (по сравнению с исходными) кольцевых междоузлий. Их источником могут быть точечные дефекты ФСС. Мы предположили также, что большие по размеру междоузлия (нанопоры) способны более активно перемещаться по сетке посредством переключения межатомных связей от одной пары атомов на границе междоузлия к другой, чему способствует «мягкое» состояние сетки ФСС. Поскольку в жестком состоянии сетки переключение связей и, соответственно, миграция приостанавливаются, то это способно приводить к неравномерному изменению плотности сетки в ходе экспонирования, в результате чего ПП в них изменяется также квазиступенчатым образом. Миграцией нанопор из сердцевины в оболочку световода можно объяснить различие между средним и амплитудным значениями НПП при записи и отжиге брэгговской решетки.

Предложенная модель отличается от уже существующих тем, что она дополняет картину формирования неоднородностей сетки представлением о фотоиндуцированном перемещении сеточных кластеров.

Авторы благодарят Е.Б.Крюкову за проведение измерений на ИК спектрометре, А.А.Рыбалтовского за подготовку объемных образцов ФСС и С.А.Васильева за помощь в проведении отжига образцов. Работа частично поддержана РФФИ (грант № 05-02-16207-а).

1. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings* (Boston – London: Artech House, 1999, p. 422).
2. Piao F., Oldham W.G., Haller E.E., *J. Appl. Phys.*, **87** (7), 3287 (2000).
3. Douay M., Xie X., Taunay T., et al. *J. Lightwave Technol.*, **18** (8), 1329 (1997).
4. Borrelli N.F., Smith C.M., Allan D.C. *Opt. Lett.*, **24** (20), 1401 (1999).
5. Дианов Е.М., Колташев В.В., Машинский В.М. и др., *Квантовая электроника*, **25** (2), 103 (1998).
6. Ларионов Ю.В., Рыбалтовский А.А., Семенов С.Л. и др., *Квантовая электроника*, **34** (2), 175 (2004).
7. Ларионов Ю.В., Плотниченко В.Г., Соколов В.О. *Квантовая электроника*, **37** (6), 575 (2007).
8. Ларионов Ю.В., Плотниченко В.Г., Соколов В.О. *Квантовая электроника*, **38** (10), 945 (2008).
9. Ларионов Ю.В. *Препринт ИОФРАН № 37* (М., 2005).
10. Рыбалтовский А.А., Соколов В.О., Плотниченко В.Г. и др. *Квантовая электроника*, **37** (4), 388 (2007).
11. Божков А.С., Васильев С.А., Медведков и др. *ПТЭ*, **48** (4), 76 (2005).
12. Рыбалтовский А.А. *Канд. дис.* (М., ИОФАН, 2007).
13. Ларионов Ю.В. *Квантовая электроника*, **40** (2010), в печати.
14. Сулимов В.Б., Соколов В.О., Дианов Е.М., Пумеллек Б. *Квантовая электроника*, **23** (11), 1013 (1996).
15. Chen Yi Chun et al. *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 15506 (2007).
16. Кукушкин С.А., Осипов А.В., Шлягин М.Г. *ЖТФ*, **76** (8), 73 (2006).