

# Исследование динамики преобразования точечных дефектов в фосфоросиликатных световодах по наведенному показателю преломления

Ю.В.Ларионов, А.А.Рыбалтовский, С.Л.Семенов,  
М.А.Курзанов, А.З.Обидин, С.К.Вартапетов

*Предложен метод исследования динамики преобразования дефектов в волоконных световодах под действием УФ излучения по дозной зависимости наведенного показателя преломления. С помощью этого метода исследованы процессы преобразования дефектов в фосфоросиликатном волоконном световоде с малыми потерями, насыщенном молекулярным водородом, при экспонировании его на длине волны 193 нм. Выдвинуто предположение о существовании в нем по крайней мере двух типов дефектов, ответственных за наведение показателя преломления.*

**Ключевые слова:** фосфоросиликатный световод, фоточувствительность, точечные дефекты стекла, наведенный показатель преломления, эксимерный лазер.

## 1. Введение

Известно, что рост наведенного показателя преломления (ПП) в германосиликатных (ГСС) и фосфоросиликатных (ФСС) световодах под действием УФ излучения заметно усиливается при насыщении их водородом. В [1] было показано, что фотохимические реакции, с которыми связано увеличение наведенного ПП в этих условиях, проходят в два этапа. На первом этапе под действием УФ излучения происходит встраивание водорода в сетку стекла с разрушением исходных дефектов стекол и образованием новых, «промежуточных» дефектов. При дальнейшем экспонировании на втором этапе происходит разрушение промежуточных дефектов и образование «конечных» дефектов третьего типа, определяющих изменение показателя преломления стекла. Оба этапа этой фотохимической реакции при экспонировании протекают в одно и то же время, что затрудняет исследование каждого из них. Принципиально возможно отделить фотохимические реакции второго этапа от первого, если на определенном этапе экспонирования удалить водород, присутствующий в световоде. Из-за накопления в сетке стекла промежуточных дефектов в начальный период фотохимические реакции второго этапа могут продолжаться при возобновлении экспонирования. При этом происходит преобразование накопленных промежуточных дефектов в конечные с наведением ПП, по изменению которого можно исследовать динамику фотохимической реакции второго этапа процесса [2].

К настоящему времени по крайней мере в двух типах световодов (в ГСС и ФСС), насыщенных молекулярным водородом, обнаружены двухэтапные фотохимические реакции, в которых участвуют различные дефекты [3]. Таким образом, этот тип реакции наведения ПП может

оказаться универсальным для насыщенных водородом световодов. Существует попытка теоретического описания динамики дефектов фотохимической реакции в таких световодах [2]. Высказаны предположения о реагентах (т. е. о конкретном виде дефектов), участвующих в каждом этапе этих реакций, происходящих в ГСС [2] и ФСС [4]. Описанное явление двухэтапного процесса наведения ПП в световодах, насыщенных водородом, предложено использовать в качестве основы технологии изменения ПП, называемой предэкспонированием. Такая технология может иметь ряд преимуществ по сравнению с обычной, в которой этапы изменения ПП при экспонировании не разделяются [2].

Универсальность проявления рассматриваемого процесса требует, по-видимому, более глубокого его исследования на феноменологическом уровне, даже без привязки к его конкретной реализации на уровне фотохимических реакций в различных материалах. В частности, необходимо выявить, является ли этот процесс основным или, возможно, даже единственным при наведении ПП в волоконных световодах.

Целью данной работы является исследование роли двухэтапной фотохимической реакции при наведении ПП в ФСС на основе анализа динамики преобразования дефектов под действием УФ излучения.

## 2. Теория

Для математического выражения изменений концентрации дефектов в сердцевине световода под действием УФ излучения в [2] были предложены уравнения, используемые для описания кинетики химических процессов. Изменения концентраций исходных  $A$ , промежуточных  $B$  и конечных  $C$  дефектов в двухэтапном процессе экспонирования световодов, насыщенных водородом, могут быть представлены в дифференциальной форме в следующем виде:

$$\dot{A} = -v_1 A, \quad (1a)$$

$$\dot{B} = v_1 A - v_2 B, \quad (16)$$

Ю.В.Ларионов, А.А.Рыбалтовский, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38  
М.А.Курзанов, А.З.Обидин, С.К.Вартапетов. Научный центр физического приборостроения при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 142190 Троицк, Московская обл.

$$\dot{C} = v_2 B, \quad (1в)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – скорости фотохимических реакций на 1-м и 2-м этапах. Решения этих дифференциальных уравнений имеют вид

$$A = A_0 e^{-v_1 t},$$

$$B = v_1 A_0 \left( \frac{e^{-v_1 t} - e^{-v_2 t}}{v_2 - v_1} \right), \quad (2)$$

$$C = A_0 \left[ 1 + \left( \frac{v_1 e^{-v_2 t} - v_2 e^{-v_1 t}}{v_2 - v_1} \right) \right],$$

где  $A_0$  – начальная концентрация исходных дефектов;  $t$  – время или доза экспонирования. Зависимости концентрации каждого вида дефектов от времени или дозы экспонирования представлены на рис.1.

Анализ выражений (2) показывает, что при любом соотношении скоростей процессов на этапах 1 и 2 существует максимум функции  $B(D)$  ( $D$  – доза экспонирования). Он возникает из-за того, что прирост концентрации промежуточных дефектов (при уменьшенной концентрации исходных) становится при некоторой дозе  $D$  таким малым, что сравнивается с потреблением этих дефектов во втором процессе (см. уравнение (1б)). Из существования максимума функции  $B$  следует, что для функции  $C(D)$  при таком же значении  $D$  должен существовать «перегиб», т. е. она должна иметь S-образную форму: начальный участок с ограниченным ростом функции, увеличенный рост на промежуточном участке и ослабление роста на конечном участке. Термин «S-образная форма» впервые был введен в [5] для обозначения характерного вида дозной зависимости, наблюдавшейся в эксперименте. Существование максимума функции  $B(D)$  и S-образную форму функции  $C(D)$  можно видеть на рис.1, где отношение  $v_1/v_2 = 1$ . Отметим важную особенность функции  $C(D)$ . Из (1в) следует, что ее производная с точностью до коэффициента совпадает с функцией  $B(D)$ , поэтому вид их графиков должен быть одинаков.

Рассмотрим изменение формы функций  $C(D)$  и  $B(D)$  при различных соотношениях скоростей  $v_1$  и  $v_2$ . В случае  $v_1 \gg v_2$  максимум функции  $B(D)$  растет и приближается к

оси ординат. Перегиб в графике функции  $C(D)$  также располагается ближе к оси ординат, и S-образная форма зависимости становится практически незаметной. Спад функции  $B(D)$  и рост  $C(D)$  почти во всем диапазоне доз при этом определяется самым медленным процессом, идущим со скоростью  $v_2$ . При увеличении  $v_2$  до  $v_2 \gg v_1$  значение максимума функции  $B(D)$  заметно уменьшается, сам максимум также смещается к началу координат, S-образная форма зависимости  $C(D)$ , как и в предыдущем случае, практически исчезает, и процесс преобразования дефектов происходит для наблюдателя также одноступенно со скоростью  $v_1$ . Наиболее заметна S-образная форма зависимости в случае, когда  $v_1 = v_2$  (рис.1).

Таким образом, S-образная форма зависимости  $C(D)$  и, соответственно, наведенного ПП от дозы экспонирования может являться признаком двухэтапного процесса, а положение максимума в дозной зависимости  $B(D)$  – свидетельствовать о соотношении скоростей  $v_1$  и  $v_2$ . При  $v_1 \gg v_2$  или  $v_2 \gg v_1$  могут возникнуть сложности обнаружения S-образной формы зависимости наведенного ПП в эксперименте. Другим практически важным выводом является то, что производная от дозной зависимости наведенного ПП способна отражать динамику концентрации промежуточных дефектов в двухэтапном процессе их преобразования.

Зависимость концентрации дефектов и, соответственно, наведенного ПП от дозы экспонирования  $D$  может быть выражена в более полном виде по закону, представленному, например, в [6]:

$$\Delta N \sim c D^f, \quad (3)$$

где  $c$  и  $f$  ( $f < 1$ ) – эмпирические константы.

Мы, однако, воспользуемся уравнениями (2), поскольку именно они дают возможность объяснить возникновение S-образной формы в дозной зависимости наведенного ПП.

### 3. Эксперимент и анализ результатов

Для экспериментального исследования динамики фотохимических реакций, происходящих в сердцевине световода под действием УФ излучения, необходимо следить за изменением концентрации всех трех типов дефектов. Эти изменения могут отражаться в дозных зависимостях таких параметров, как наведенные ПП и поглощение, интенсивность люминесценции, интенсивность полос в спектре комбинационного рассеяния или интенсивность ЭПР-сигнала. По-видимому, для всех этих параметров существование S-образной формы дозной зависимости может свидетельствовать о прохождении двухэтапного процесса, а изменения в производной от дозной зависимости – отображать динамику концентрации дефектов на предшествующей стадии фотохимического процесса.

К настоящему времени известно несколько работ, в которых дозные зависимости указанных выше регистрируемых в эксперименте величин сопоставляются с динамикой концентрации дефектов в световодах. В [7] продемонстрирована возможность регистрации динамики концентрации исходных и промежуточных дефектов  $A$  и  $B$  по интенсивности люминесценции. В [8] сопоставлена дозная зависимость наведенного ПП, полученная по результатам записи брэгговской решетки в световоде с ди-

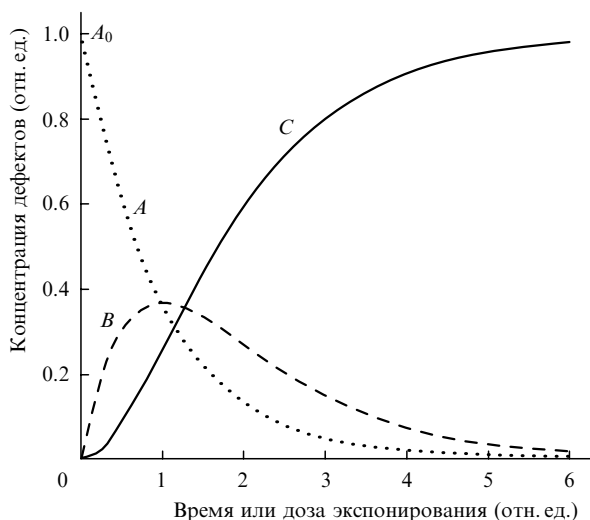


Рис.1. Временные или дозные зависимости концентрации дефектов типа  $A$ ,  $B$ ,  $C$  при  $v_1 = v_2$ .

намикой концентрации дефектов, полученных по данным ЭПР. На наш взгляд, наиболее точным является метод регистрации дозной зависимости наведенного ПП с использованием интерференционной методики.

Будем предполагать, как и в [2], что концентрация конечных дефектов  $C$  линейно связана с наведенным ПП, что позволяет фиксировать ее изменения экспериментально. По нашему мнению, изменение концентрации промежуточных дефектов также можно наблюдать экспериментально при использовании процедуры предэкспонирования. Для этого несколько образцов насыщенного водородом световода предэкспонируют различными дозами, удаляют нагревом оставшуюся в них часть водорода, а затем все предэкспонированные участки подвергают дальнейшему экспонированию одинаковой небольшой дозой. В результате можно построить зависимость наведенного ПП от дозы предэкспонирования для заданного значения  $D$ . Поскольку начальный рост наведенного ПП на втором этапе процесса в предэкспонированных образцах зависит от накопленной концентрации промежуточных дефектов  $B$  на различных участках, то изменения наведенного ПП в зависимости от дозы предэкспонирования будут следовать за изменениями в концентрации этих дефектов.

По-видимому, в подобном же эксперименте можно зафиксировать и динамику концентрации исходных дефектов  $A$  в зависимости от дозы, если процесс этого изменения является одноэтапным.

К настоящему времени зарегистрировано множество дозных зависимостей наведенного ПП, полученных при различных условиях экспонирования световодов разных типов. По нашим данным, S-образная форма дозной зависимости обнаружена по крайней мере для двух типов световодов: легированных фосфором [9] и одного световода, легированного германием (для SMF28 [5]). В большинстве других экспериментов с германосиликатными световодами S-образная форма дозной зависимости, по-видимому, не наблюдается, поэтому можно предположить, что для этих световодов  $v_1 \gg v_2$  или  $v_1 \ll v_2$ . В настоящей работе, однако, мы проведем анализ данных только для ФСС, где S-образная форма дозной зависимости проявляется воспроизводимо для световодов с различной концентрацией окиси фосфора.

S-образная форма дозной зависимости была обнаружена при первом же экспонировании ФСС [9]. В [4] было высказано предположение, что такая форма зависимости определяется двумя различными фотохимическими реакциями, последовательно проходящими в сердцевине световода при увеличении дозы  $D$ . В этой же работе была впервые представлена зависимость наведенного ПП в ФСС от дозы предэкспонирования. Она, так же как и подобная зависимость для ГСС, имела максимум, однако он достигался при дозе  $\sim 1.5 - 2$  кДж/см<sup>2</sup>, а не при дозе  $\sim 100$  Дж/см<sup>2</sup>, как для ГСС [2]. В [4] было также показано, что при экспонировании предэкспонированного образца S-образная дозная зависимость, характерная для ФСС, отсутствует, что указывает на одноэтапный процесс преобразования дефектов.

Экспериментальные исследования в настоящей работе проводились для ФСС с малыми оптическими потерями [10]. Молярное содержание в нем окисла фосфора составило около 12%, разность показателей преломления в сердцевине и в оболочке  $-0.01$ , длина волны отсечки  $\lambda_c = 1.1$  мкм. Световоды насыщались молекулярным

водородом при внешнем давлении 100 атм и температуре 100°C. Экспонирование проводилось эксимерными лазерами CL-7000 и Lumonics-520 ( $\lambda = 193$  нм) с плотностью энергии в импульсе 100–300 мДж/см<sup>2</sup>. Частота следования лазерных импульсов во всех экспериментах составляла 10 Гц. Дозные зависимости наведенного ПП измерялись с помощью интерферометров Маха–Цендера, создаваемых в исследуемом световоде [11], для чего в нем формировались две длиннопериодные решетки на некотором расстоянии друг от друга. При прохождении света через первую решетку возникала оболочечная мода, которая после прохождения второй интерферировала с основной модой. Запись первой решетки производилась таким образом, чтобы потери в ней составляли  $\sim 3$  дБ, это обеспечивало разделение мощности света, прошедшего через решетку, на две примерно равные части и высокую видимость интерференционной картины (15–20 дБ) после записи второй решетки. Наведение ПП в сердцевине волокна изменяло фазу только в одном плече интерферометра. Измерение наведенного ПП производилось, как правило, на длине волны вблизи 1.5 мкм. Изменения положения пиков интерференционной картины фиксировались с помощью оптического спектроанализатора AQ6317 с точностью  $\pm 0.05$  нм.

На рис.2 и 3 представлены характерная дозная зависимость ПП и ее производная по дозе, полученные для одного из образцов ФСС. Кривая на рис.2 имеет S-образную форму в диапазонах доз 0–4 и 4–10 кДж/см<sup>2</sup>, а на рис.3 – два максимума и два минимума соответственно.

На этом же световоде был проведен эксперимент с предэкспонированием. Для этого в куске световода, насыщенного молекулярным водородом, вначале был создан интерферометр. Промежуток между длиннопериодными решетками интерферометра был разделен на несколько участков, каждый из которых подвергся предэкспонированию одной из доз в диапазоне 0.2–2.4 кДж/см<sup>2</sup>, в котором наблюдалась S-образная зависимость наведенного ПП (рис.2). Затем из интерферометра был удален водород и каждый из предэкспонированных участков был вновь проэкспонирован дозой 2 кДж/см<sup>2</sup>. Значения наведенного ПП для каждого из предэкспонированных участков представлены на рис.4 в виде зависимости от дозы предэкспонирования. Измерения наведенного ПП

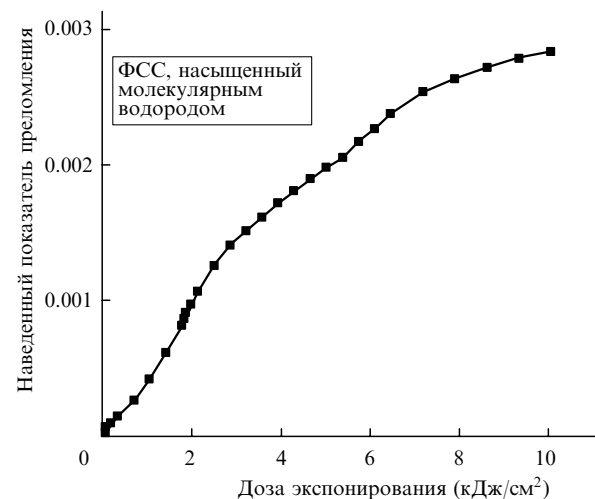


Рис.2. Дозная зависимость наведенного ПП, полученная для одного из исследованных образцов ФСС.

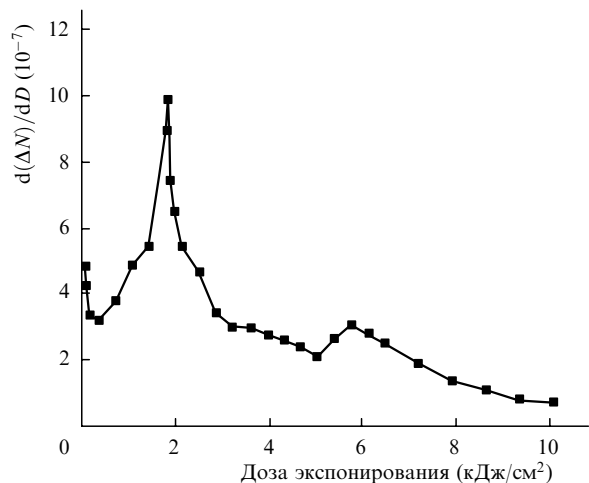


Рис.3. Производная от наведенного ПП по дозе для его дозной зависимости, представленной на рис.2.

проводились на двух длинах волн света, проходящего через эти участки. Результаты, полученные в этих двух сериях измерений, хорошо согласуются между собой. Различия между ними дают приблизительную оценку погрешности измерений наведенного ПП при экспонировании единичного участка интерферометра. Как видно из рис.4, она не превышает 10 % и определяется в основном разницей в значениях наведенного ПП при измерении на длине волны 1325 и 1495 нм.

Из сопоставления кривых, представленных на рис.3 и 4, видно, что зависимости коррелируют между собой в указанном диапазоне доз. Значения доз, при которых достигаются минимум (около 0.3 кДж/см<sup>2</sup>) и максимум (1.8–2 кДж/см<sup>2</sup>), практически совпадают. Отметим также, что положение первого максимума подтверждает, что оптимальная доза предэкспонирования составляет примерно 2 кДж/см<sup>2</sup>. Это впервые было сообщено в [4].

Из сопоставления графиков следует, что, во-первых, зависимость наведенного ПП от дозы предэкспонирования действительно отображает динамику изменения концентрации промежуточных дефектов в процессе их экс-

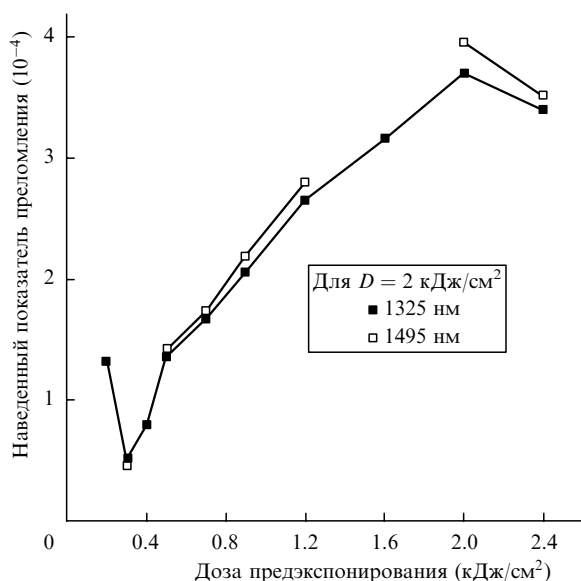


Рис.4. Зависимость наведенного ПП от дозы предэкспонирования по измерениям на длинах волн 1325 и 1495 нм.

понирования. Во-вторых, уравнения химической кинетики могут быть использованы для описания динамики дефектов в сетке стекла, а производная от дозной зависимости способна отобразить изменения в концентрации промежуточных дефектов.

Важной особенностью графика, представленного на рис.2, является существование S-образной характеристики в двух диапазонах доз, а на рис.3 – наличие двух максимумов и разделяющего их минимума. Значение дозы второй пары экстремумов на рис.3 изменяется для различных образцов интерферометров. Обнаружение двух пар экстремумов в производной от дозной зависимости свидетельствует о том, что динамика процесса преобразования дефектов является более сложной и не определяется единственным двухэтапным процессом, предполагавшимся в [2].

По результатам представленного выше эксперимента необходимо также сделать несколько методических замечаний.

1. Дозные зависимости наведенного ПП можно фиксировать не только с помощью интерферометра, но и по результатам записи брэгговских решеток в волоконном световоде. Для сравнения мы произвели запись нескольких брэгговских решеток в исследуемом волокне с помощью фазовой маски с периодом 1.06 мкм. В результате в спектре пропускания света через решетку возник пик потерь на длине волны 1.48 мкм. Глубина этого пика регистрировалась при увеличении дозы экспонирования и использовалась для вычисления наведенного ПП и построения его дозной зависимости.

Сравнительные результаты вычислений производной от дозной зависимости наведенного ПП в ФСС по данным экспонирования трех участков интерферометра и трех брэгговских решеток представлены на рис.5. В каждом способе наведения ПП в волокне варьировалась плотность энергии эксимерного лазера в импульсе. Набор плотностей энергии для каждого способа экспонирования был одинаков. Видно, что при экспонировании интерферометра положение максимумов на рис.5 с изменением плотности энергии в импульсе практически не меняется и воспроизводится положение минимума в двух из трех результатов экспонирования. Дозы экспонирования, при которых достигаются минимумы (~400 Дж/см<sup>2</sup>) и максимумы (~1700 – 1900 Дж/см<sup>2</sup>) в интерферометрическом способе, близки к значениям, представленным на рис.3. В случае брэгговских решеток экстремумы в дозной зависимости производной наведенного ПП фиксируются намного хуже: максимумы смещаются в зависимости от значения дозы, а минимумы вообще исчезают.

Плохая воспроизводимость в положении экстремумов, получаемая при экспонировании брэгговских решеток, может определяться различием в динамике процесса наведения ПП при записи периодической структуры в виде брэгговской решетки в сравнении с экспонированием гомогенным пучком в случае интерферометра, а также потенциально более точным измерением наведенного ПП в интерференционном способе регистрации [11].

2. Вид дозной зависимости наведенного ПП, получаемой с помощью интерферометра, существенно зависит от распределения водорода в оболочке световода. Это распределение меняется из-за выхода водорода из оболочки в окружающее пространство в процессе его диффузии. Поэтому для лучшей воспроизводимости значений наведенного ПП от дозы в разных участках интерферо-

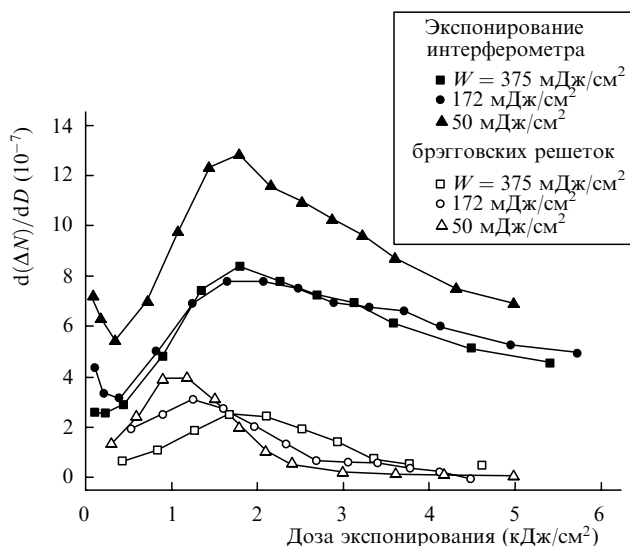


Рис.5. Дозные зависимости производной от наведенного ПП по данным экспонирования трех участков интерферометра и трех брэгговских решеток при плотности энергии эксимерного лазера в импульсе  $I = 375, 172$  и  $50$  мДж/см<sup>2</sup>.

метра измерения необходимо проводить через одинаковый промежуток времени после извлечения интерферометра из водородной камеры.

3. Изменения концентрации промежуточных дефектов в световоде могут быть выявлены по результатам его экспонирования двумя методами. Однако использование для этой цели дозной зависимости ПП и ее производной предпочтительнее, т. к. построение зависимости от дозы предэкспонирования является гораздо более трудоемкой операцией.

Представим результаты исследований, которые могли бы прояснить происхождение первого минимума дозной зависимости производной от наведенного ПП. Можно предположить, что существование этого минимума при дозе  $\sim 300 - 400$  Дж/см<sup>2</sup> на рис.3–5 свидетельствует об уменьшении концентрации неких иных исходных дефектов  $A_{01}$ , отличных от тех, которые принимают участие в двухэтапном процессе наведения ПП. Далее можно предположить, что их преобразование под действием УФ излучения происходит за один этап и приводит к появлению дефектов конечного типа  $C_{01}$  и, следовательно, к наведению ПП в диапазоне доз до  $\sim 500$  Дж/см<sup>2</sup>. О возможности выявлять динамику концентрации исходных дефектов по анализу дозных зависимостей в одноэтапном процессе преобразования говорилось в разд.2 этой работы.

Предположение о существовании другого типа дефектов в ФСС подтверждается, на наш взгляд, следующими результатами. На рис.6 приведены данные наведения ПП на двух участках интерферометра, световод которого свободен от водорода: на не подвергавшемся предэкспонированию и на предэкспонированном дозой  $180$  Дж/см<sup>2</sup>. Результат наведения стабильного во времени ПП в ненасыщенном водородом ФСС при экспонировании его на  $\lambda = 193$  нм получен, по нашему мнению, впервые. Сам факт наведения ПП в ФСС без водорода может свидетельствовать о существовании дефектов, отличных от тех, которые принимают участие в двухэтапном процессе фотохимической реакции. На обеих кривых на рис.6 заметен рост наведенного ПП до уровня дозы в  $300 - 500$  Дж/см<sup>2</sup> (что примерно соответствует положению мини-

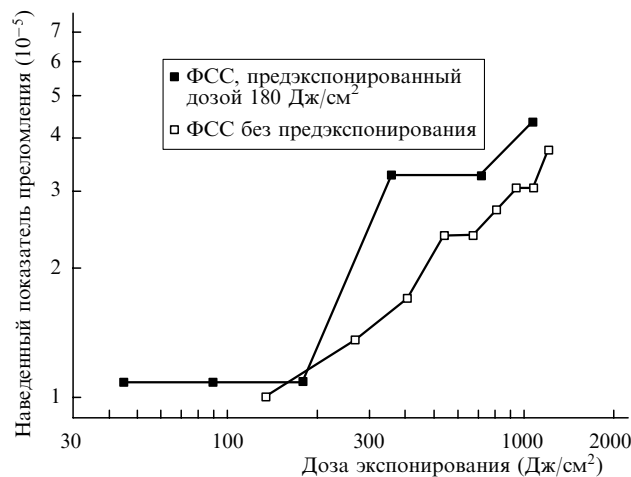


Рис.6. Дозные зависимости наведенного ПП для двух образцов, свободных от водорода: не подвергавшегося предэкспонированию и предэкспонированного дозой  $180$  Дж/см<sup>2</sup>.

мумов на рис.3 и 4) и замедление роста после него. Возможно, ПП наводился и при дозах, меньших  $100$  Дж/см<sup>2</sup>, однако это не было зафиксировано из-за недостаточной чувствительности интерферометра. Примерное совпадение значения дозы экспонирования, при которой происходит разрушение предполагаемых исходных дефектов  $A_{01}$  (рис.3, 4) и дозы ( $\sim 500$  Дж/см<sup>2</sup>), при которой достигается насыщение концентрации дефектов конечного типа  $C_{01}$  (рис.6), подтверждает предположение о том, что в этих экспериментах фиксируется один и тот же одноэтапный процесс преобразования дефектов.

Результат экспонирования предэкспонированного участка интерферометра (рис.6) свидетельствует, на наш взгляд, о прохождении фотохимических реакций с дефектами двух типов. Во первых, в результате экспонирования происходит разрушение дефектов с одноэтапным преобразованием в их конечную форму. Их полное разрушение приводит к появлению «полочки» в росте наведенного ПП. Однако основной прирост ПП вызывается, по-видимому, двухэтапным преобразованием в конечную форму промежуточных дефектов, которые возникли в световоде в результате предэкспонирования. Последних, видимо, уже достаточно для того, чтобы дозная зависимость для предэкспонированного образца оказалась выше, чем для исходного (рис.6).

Предположение о существовании двух типов исходных дефектов в ФСС было проверено также с помощью анализа дозных зависимостей наведенного поглощения (НП) в ФСС. Исследование НП было проведено с использованием фурье-спектрометра и спектрофотометра Perkin-Elmer на объемных образцах, вырезанных из заготовок, подобной той, из которой производилась вытяжка исследуемых световодов, с молярной концентрацией оксида фосфора  $12\%$ . Экспонирование этих образцов производилось теми же эксимерными лазерами и в тех же режимах, что и при наведении ПП. Измерения НП производились через несколько дней после проведения экспонирования, когда релаксационные процессы в световодах, связанные с экспонированием, экспериментально по НП не фиксировались.

На рис.7 показаны дозные зависимости НП в максимуме полосы поглощения на длине волны  $3050$  нм, соответствующей валентному колебанию гидроксила в силанольной группе, водородно связанной с немостиковым

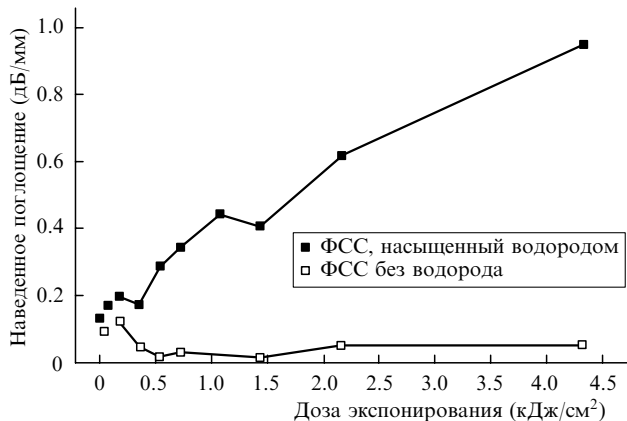


Рис. 7. НП в полосе поглощения на  $\lambda = 3050$  нм для насыщенного водородом и свободного от водорода ФСС.

атомом кислорода фосфорных тетраэдров сетки стекла. Изменения НП на этой длине волны связаны с наведением ПП в ФСС [12]. На рис.8 показано изменение НП в УФ диапазоне в полосах поглощения 260, 270, 400 и 550 нм, соответствующих электронным переходам фосфорных центров окраски.

На всех графиках на рис.8 при дозе  $\sim 400$  Дж/см<sup>2</sup> меняется характер дозных зависимостей НП: в УФ и видимом диапазонах длин волн значение НП стабилизируется для свободных от водорода образцов и начинается его медленный рост для образца, насыщенного водородом. В ИК диапазоне при этой дозе происходит спад НП для обоих образцов, вслед за которым начинается его медленный подъем для образца, насыщенного водородом.

При сопоставлении дозных зависимостей НП с динамикой преобразования дефектов можно использовать те же представления о двухэтапном процессе и трех типах дефектов, что и в случае дозных зависимостей для наведенного ПП.

Естественно предположить, что изменения в дефектах одноэтапного процесса преобразования проще выявить по НП в световодах, свободных от водорода. При этом, по-видимому, в ИК диапазоне по спаду НП выявляется изменение концентрации дефектов исходного типа, а изменение концентрации их конечной формы – по росту и

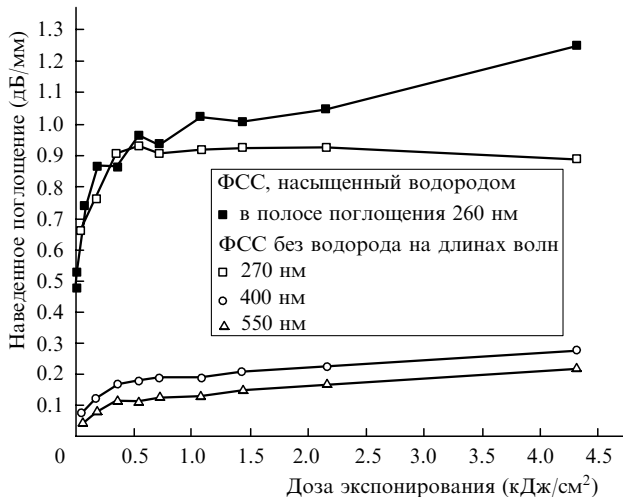


Рис. 8. НП для насыщенного водородом ФСС в полосе поглощения 260 нм и для ФСС без водорода в полосах поглощения 270, 400 и 550 нм.

насыщению НП в УФ и видимом диапазонах. Как видно, спад НП в ИК диапазоне при дозах экспонирования до 400 Дж/см<sup>2</sup> (рис.7) коррелирует с уменьшением ПП в дозной зависимости в эксперименте с предэкспонированием (рис.4) или с уменьшением производных от дозных зависимостей на рис.3 и 5, а рост и насыщение НП в УФ и видимом диапазонах при дозе более 400 Дж/см<sup>2</sup> (рис.8) коррелируют с данными по динамике наведенного ПП, представленными на рис.6.

По-видимому, в случае насыщенных водородом образцов в изменениях НП в ИК диапазоне длин волн вместе с динамикой концентрации исходных дефектов одноэтапного процесса отображается также и динамика концентрации промежуточных дефектов двухэтапного процесса. Об этом может свидетельствовать излом дозной зависимости НП для насыщенного водородом образца при дозе  $\sim 1.1 - 1.5$  кДж/см<sup>2</sup> (рис.7), что несколько меньше значения  $1.7 - 2$  кДж/см<sup>2</sup>, при котором достигается максимум для концентрации промежуточных дефектов (рис.3–5). Отличие дозы экспонирования для этого излома НП от положения максимумов в наведенном ПП на рис.3–5 может быть объяснено низкой воспроизводимостью оценки дозного положения малого по величине излома НП на рис.7. Излом дозной зависимости НП для насыщенного водородом образца ФСС в диапазоне доз экспонирования до 500 Дж/см<sup>2</sup> (рис.7) можно объяснить наложением дозных зависимостей НП, связанных с изменениями концентрации дефектов, участвующих в одноэтапном и двухэтапном процессах преобразования. Значение дозы для этого излома близко к таковым для минимумов на рис.3–5 ( $\sim 400$  Дж/см<sup>2</sup>).

#### 4. Выводы

Предложен достаточно простой в реализации и информативный метод исследования преобразования дефектов в сердцевине световодов под действием УФ излучения, заключающийся в анализе формы кривой дозной зависимости наведенного ПП и производной от нее. S-образная форма дозной зависимости наведения ПП может быть признаком двухэтапного процесса преобразования дефектов в сетке стекла. Производная наведенного ПП в дожной зависимости отображает динамику изменения концентрации дефектов промежуточного типа.

Анализ дожных зависимостей наведенного ПП и НП в ФСС позволяет сделать предположение о существовании по крайней мере двух типов исходных дефектов в сердцевине ФСС и двух каналов их преобразования в конечную форму, вызывающую изменение ПП: дефектов с одноэтапным преобразованием без участия водорода и дефектов с двухэтапным преобразованием, для которых фотохимические реакции с водородом необходимы. Эти фотохимические реакции протекают в различных диапазонах доз экспонирования. Реакции первого типа заканчиваются при дозах около 500 Дж/см<sup>2</sup>, реакции второго типа (с участием водорода) – при дозах около 2000 Дж/см<sup>2</sup>. В результате реакций первого типа ПП увеличивается на  $(3 - 4) \times 10^{-5}$ . Этот факт наведения стабильного во времени ПП в ФСС, свободном от водорода, получен, по нашему мнению, впервые и подтверждает существование двух типов исходных дефектов в таких световодах. Однако основным процессом, приводящим к наведению в ФСС показателя преломления  $\sim 10^{-3}$ , является двухэтапный процесс с участием водорода на первом этапе.

Прохождение двухэтапной фотохимической реакции в ФСС объясняет S-образную форму дозной зависимости наведенного ПП. Однако реальная форма зависимости наведенного ПП от дозы экспонирования сложнее S-образной. Это может быть связано с прохождением одновременно нескольких фотохимических реакций в диапазоне доз экспонирования 0 – 10 кДж/см<sup>2</sup>.

Возможность описания динамики фотохимических реакций в ФСС с помощью относительно простых уравнений химической кинетики подтверждена экспериментально по корреляции кривой для производной от дозной зависимости, полученной с помощью интерферометрического способа измерения наведенного ПП, и кривой для дозной зависимости от дозы предэкспонирования.

Авторы благодарят В.Г.Плотниченко за полезные обсуждения и ценные замечания по теме публикации, Е.Б.Крюкову и Ю.Н.Пыркова – за измерение наведенного поглощения в объемных образцах заготовки.

1. Canning J., Pasman R., Sceats M.G. *Proc. Conf. Photosens. Quadr. Non-Linearity in Glass Waveguides* (Portland, Oregon, 1995, p. 86).
2. Canning J. *Opt. Fiber Techn.*, **6**, 275 (2000).
3. Semenov S., Rybaltofsky A., Larionov Y., Bubnov M., Dianov E. In: *Bragg Gratings, Photo-sensitivity, and Poling in Glass Waveguides, Techn. Dig.* (Stuart, Florida, 1999, ThE8-1).
4. Ларионов Ю.В., Рыбалтовский А.А., Семёнов С.Л., Бубнов М.М., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **32** (2), 124 (2002).
5. Ramecourt D., Niay P., Bernage P., Riant I., Douay M. *Electron. Lett.*, **35** (4), 329 (1999).
6. Griscom D.L., Gingerich M.E., Friebele E.J. *Phys. Rev. Lett.*, **71** (7), 1019 (1993).
7. Kuswanto H., Goutaland F., Boukenter A., Ouerdane Y. In: *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, Techn. Dig.* (Stressa, Italy, 2001, BThc26-1).
8. Tsai T.-E., Friebele E.J. In: *Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass, Fibers and Waveguides: Applications and Fundamentals, Techn. Dig.* (Williamsburg, Virginia, 1997, JMA4-1).
9. Malo B. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 394 (1994).
10. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Plotnichenko V.G., Koltashev V.V., Belov A.V., Bubnov M.M., Semenov S.L., Prohorov A.M. *Electron. Lett.*, **33** (18), 1542 (1997).
11. Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И., Фролов А.А. *Квантовая электроника*, **24** (9), 805 (1997).
12. Dianov E.M., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sokolov V.O., Sulimov V.B. *J. Non-Cryst. Sol.*, **249**, 29 (1999).