

Особенности проявления фоточувствительности в фосфоросиликатных световодах с малыми потерями

Ю.В.Ларионов, А.А.Рыбалтовский, С.Л.Семенов, М.М.Бубнов, Е.М.Дианов

Впервые выявлены особенности наведения показателя преломления в световодах с низкими потерями и высоким содержанием окиси фосфора, изготовленных методом MCVD, при экспонировании их УФ излучением. Обнаружен эффект предэкспонирования. Рассмотрены и сопоставлены особенности механизма наведения показателя преломления в фосфоросиликатных и германосиликатных световодах при наличии этого эффекта.

Ключевые слова: рамановский конвертор, фосфоросиликатный световод, фоточувствительность, предэкспонирование.

1. Введение

При использовании в рамановских конверторах фосфоросиликатные световоды (ФСС) имеют преимущество перед германосиликатными световодами (ГСС) [1]. Однако образцы ФСС с малыми потерями, необходимые для эффективных рамановских конверторов, получены относительно недавно [2] и многие их характеристики еще недостаточно изучены. Одной из таких характеристик является фоточувствительность – свойство, проявляющееся в изменении показателя преломления (ПП) Δn_{ind} при экспонировании световодов УФ излучением и используемое для формирования зеркал на основе внутриволоконных брэгговских решеток.

Недавно был обнаружен эффект, позволяющий увеличить фоточувствительность волоконных и планарных световодов и проявляющийся в двухэтапном процессе экспонирования [3]. Суть эффекта состоит в том, что перед основным процессом экспонирования световода (например, при записи в нем решетки показателя преломления) производится его насыщение молекулярным водородом и предварительное экспонирование гомогенным пучком (доза экспонирования относительно невелика). Затем остатки молекулярного водорода из световода удаляются. При записи решетки ПП в ходе основного экспонирования на предэкспонированном участке рост наведенного ПП происходит примерно так же активно, как и в световоде, насыщенном водородом.

При экспонировании световодов, насыщенных водородом, в них вместе с наведенным ПП возникают и наведенные потери [4]. Для ФСС с малыми потерями, специально создаваемых для рамановских конверторов, дополнительные наведенные потери могут быть сравнимы с основными потерями. Это обстоятельство способно заметно ухудшить эффективность работы рамановских конверторов. Важной особенностью двухэтапного процесса наведения ПП является то, что при экспонировании

волокна в отсутствие водорода в нем наводятся заметно меньшие потери [5]. Поэтому двухэтапный процесс экспонирования при записи брэгговских решеток для создания рамановских конверторов представляется наиболее перспективным.

В настоящее время эффект предэкспонирования обнаружен как в ГСС [3], так и в ФСС, созданных по технологии «flash condensation» [6]. Для ФСС этот эффект особенно важен, т. к. запись решеток ПП в них невозможна без насыщения световодов водородом. Однако световоды, разработанные в [6], не могут быть использованы для создания рамановских конверторов. Они имеют высокие потери ($\sim 500 - 1000$ дБ/км) [7], по-видимому, из-за большого содержания примесей, и поэтому механизм наведения в них ПП может отличаться от того, который существует в волокнах с относительно малыми потерями.

Цель настоящей работы – исследовать фоточувствительность ФСС с малыми потерями, созданных методом MCVD, оценить эффективность предэкспонирования таких световодов и выявить особенности предэкспонирования в сравнении с аналогичным эффектом в ГСС с малыми потерями.

2. Условия проведения эксперимента

Фоточувствительность ФСС проявляется при облучении на длине волны 193 нм и только в присутствии молекулярного водорода в стекле световода [8]. Поэтому в наших экспериментах для наведения ПП в ФСС использовался эксимерный лазер Lumonics-500 с газовой смесью ArF ($\lambda = 193$ нм), а волоконные ФСС насыщались водородом при температуре 100 °С и давлении 10 МПа в течение не менее 12 ч. Световоды экспонировались при плотности энергии лазерного излучения 300 мДж/см² в импульсе и частоте импульсов 10 Гц. Для создания требуемой плотности энергии излучения использовалась цилиндрическая линза с фокусным расстоянием ~ 100 мм, в расходящемся пучке которой размещался световод. Плотность энергии оценивалась по мощности излучения в импульсе, измеренной после прохождения линзы с помощью измерительного прибора ИМО-2Н, и по се-

чению лазерного пучка на выбранном расстоянии от нее. В аналогичных режимах подготавливались и экспонировались образцы ГСС.

Для наведения ПП в исходных и насыщенных молекулярным водородом ГСС мы использовали также эксимерный лазер (Lambda Physik EMG103) на смеси KrF ($\lambda = 248$ нм). Экспонирование световодов и в этом случае происходило при плотности энергии лазерного излучения 300 мДж/см² и частоте импульсов 10 Гц.

Оценка наведенного ПП производилась с помощью интерферометра Маха – Цендера (в дальнейшем – интерферометра), формируемого в испытываемом световоде двумя длиннопериодными решетками [9]. Первая из решеток интерферометра возбуждала облученную моду; вместе с основной модой она распространялась до второй длиннопериодной решетки, после прохождения которой возникала интерференция двух мод. При наведении ПП в сердцевине световода создавалась разность хода в плечах интерферометра и происходило смещение интерференционной картины. Поэтому для определения наведенного ПП Δn_{ind} мы экспонировали участок световода между решетками интерферометра однородным пучком лазера и по изменению интерференционной картины вычисляли ПП, наведенный в его сердцевине. Чувствительность такого метода контроля потенциально выше, чем метода, основанного на отражении света от тестовой брэгговской решетки, а результат не зависит от степени когерентности лазерного источника и контрастности интерференционной картины, создаваемой фазовой маской.

Исследование фоточувствительности проводилось на экспериментальных образцах ФСС, изготовленных методом MCVD, с молекулярным содержанием P_2O_5 12 % ($\Delta n \sim 0.01$) и потерями ~ 1 дБ/км. В качестве образцов ГСС использовался аналог стандартного световода SMF28 (в дальнейшем – ASMF28) с молекулярным содержанием GeO_2 3 %.

Для проверки эффекта предэкспонирования и его воспроизводимости в ФСС было создано два одинаковых интерферометра. В каждом из интерферометров промежутки между длиннопериодными решетками был разделен на несколько участков длиной ~ 6 мм и каждый из этих участков был предэкспонирован одной из доз, лежащей в интервале 0.18 – 4.3 кДж/см². Для сравнения результатов подобный интерферометр был создан и в ГСС.

3. Результаты экспериментов

На рис.1,*a* представлены дозные зависимости наведенного ПП в нескольких участках внутри интерферометра для ФСС. Кривая 1 была получена на первом этапе экспонирования (в световоде, насыщенном водородом). Кривые 2 и 3 – на втором этапе, после удаления водорода из образца. Участки световода, на которых были получены кривые 2, 3, были предэкспонированы на первом этапе различными дозами. Видно, что характер дозных зависимостей для двух стадий экспонирования качественно различен: пороговый характер дозной зависимости (увеличение наклона зависимости с ростом дозы), обычный для фосфорных световодов [10], отсутствует для второй стадии экспонирования. Для сравнения на рис.1,*б* приведена дозная зависимость, полученная нами для ASMF28, проэкспонированного без водорода (кривая 3

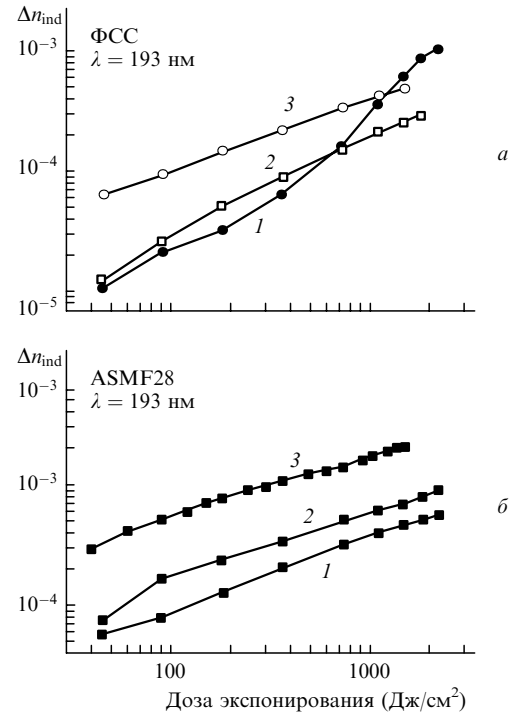


Рис.1. Зависимости наведенного показателя преломления от дозы экспонирования в ФСС для первого (1) и второго (2,3) этапов экспонирования при дозах предэкспонирования 1.06 (2) и -4.32 кДж/см² (3) (а) и в световоде ASMF28 для исходного световода (1), второго этапа экспонирования (2, доза предэкспонирования 1.06 кДж/см²) и первого этапа экспонирования (3) (б).

вая 1), для насыщенного водородом световода (кривая 3) и после предэкспонирования дозой 1.06 кДж/см² (2). Видно, что характер зависимости для ГСС существенно не меняется при всех видах его экспонирования и похож на дозную зависимость для предэкспонированного участка ФСС.

Из рис.1,*a* также видно, что значение наведенного ПП (Δn_{ind}) заметно зависит от дозы предэкспонирования ФСС. Поэтому были проведены оценки зависимости Δn_{ind} от дозы предэкспонирования D_{pe} и ее воспроизводимости на двух интерферометрах в ФСС. Для сравнения аналогичные оценки были проведены для интерферометра в ASMF28, который экспонировался излучением на длине волны 248 нм. Результаты эксперимента представлены на рис.2. Доза экспонирования второго этапа для всех участков и образцов составила 2 кДж/см².

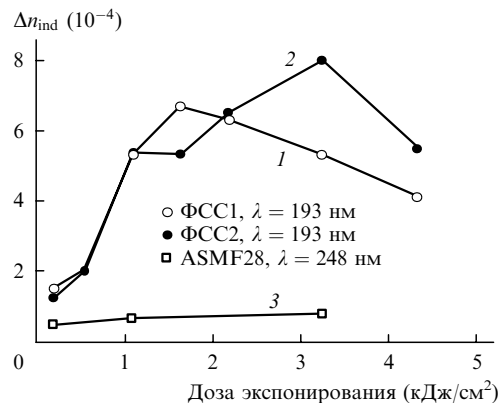


Рис.2. Зависимости наведенного ПП для двух образцов ФСС и световода ASMF28.

Отличительной особенностью кривых 1 и 2 (рис.2), полученных при предэкспонировании ФСС на длине волны 193 нм, является наличие максимума функций. Видно, что он достигается при дозе 1.5–3.2 кДж/см². При экспонировании на длине волны 248 нм в ГСС максимума зависимости $\Delta n_{\text{ind}}(D_{\text{pe}})$ получено не было (кривая 3).

Погрешность результатов, представленных на рис.1, 2, определяется как ошибками в выборе условий экспонирования, так и ошибками измерения сдвига фаз в интерферометре. В погрешность оценки дозной зависимости предэкспонированных образцов ошибка в выборе условий экспонирования входит два раза. Суммарная погрешность результатов может быть оценена повторным экспонированием образца в одинаковых условиях. Наибольшая суммарная погрешность наведенного ПП достигается при малой дозе экспонирования и в большинстве случаев не превышает 20%. О величине максимальной суммарной ошибки в наведенном ПП для предэкспонированных образцов можно судить по различию кривых 1 и 2 на рис.2. Видно, что погрешность определения максимумов кривых составляет $\sim 10^{-4}$, а погрешность определения дозы, при которой достигается максимум, равна ~ 1.5 кДж/см².

4. Обсуждение полученных результатов

Полученные экспериментальные результаты подтверждают существование эффекта предэкспонирования для ФСС с малыми потерями.

Наличие максимума в функции $\Delta n_{\text{ind}}(D_{\text{pe}})$, обнаруженное нами для ФСС (рис.2), было выявлено ранее для ГСС [6]. Похожая картина динамики этой функции для световодов, выполненных из различных материалов, позволяет предположить, что происходящие в них фотохимические реакции также схожи. Поэтому пониманию механизма предэкспонирования при наведении ПП в ФСС могли бы содействовать исследование и анализ фотохимических реакций в сетке стекла германосиликатных световодов, т.к. световоды данного состава изучены к настоящему времени более полно.

Наличие максимума функции $\Delta n_{\text{ind}}(D_{\text{pe}})$ может быть объяснено в терминах теории химической кинетики двухэтапным процессом прохождения фотохимических реакций между тремя химическими соединениями (компонентами): начальным (А), промежуточным (В) и конечным (С) [10].

Первоначальный рост концентрации компонента В связан с разрушением компонента А при его экспонировании в присутствии молекулярного водорода. Достижение максимума в функции $\Delta n_{\text{ind}}(D_{\text{pe}})$ может быть объяснено истощением компонента А (и, как следствие, прекращением роста компонента В) при продолжении преобразования В в С. Дальнейшее преобразование (расхождение) компонента В в итоговый компонент С определяет спад компонента В. Подобное объяснение было предложено и в [6].

Динамика изменения концентрации компонента С в эксперименте определяется по значениям наведенного ПП. Динамика изменения компонента В – по значению функции $\Delta n_{\text{ind}}(D_{\text{pe}})$. Действительно, в отсутствие водорода в световоде преобразования А в В не происходит, а начальный рост С в этом случае определяется только накопленным значением В. Описанный механизм не позволяет объяснить отсутствие максимума функции

$\Delta n_{\text{ind}}(D_{\text{pe}})$ при экспонировании ASMF28 на длине волны 248 нм.

Естественно предположить, что для ФСС, так же как и для ГСС, первый этап экспонирования состоит во встраивании водорода под действием УФ излучения в сетку стекла, второй – в модификации компонента, сформированного на предыдущем этапе, уже без молекулярного водорода.

Наведение ПП в волоконных световодах связано с образованием в них дефектов структуры стекла. Кинетика роста концентрации дефектов в стеклах ΔN в результате экспонирования определяется как $\Delta N \propto CD^f$, где D – доза экспонирования; C и f – эмпирические константы ($f < 1$) [12]. В связи с этим дозные зависимости наведенного ПП в логарифмическом масштабе являются, как правило, линейными. Процесс наведения ПП в ФСС на втором этапе и в ГСС на первом и втором этапах экспонирования (см. рис.1,а, кривая 2 и рис.2,б, кривые 1–3) соответствует указанной закономерности. Пороговый характер роста наведенного ПП в ФСС на первом этапе экспонирования (рис.1,а, кривая 1) наглядно демонстрирует, что этот процесс более сложен и определяется по крайней мере двумя сменяющимися друг друга этапами с различными значениями f . Отмеченный характер изменения ПП коррелирует с ростом пика поглощения на длине волны 3.05 мкм из-за увеличения числа групп ОН, связанных с фосфором [11], но не проявляется для предэкспонированных образцов. Поэтому можно предположить, что он определяется динамикой встраивания водорода в сетку ФСС.

Объяснение эффекта предэкспонирования на уровне структурных преобразований даже в случае ГСС пока не найдено, однако можно сделать предположения о некоторых особенностях механизма, ответственного за его проявление. По-видимому, определяющим моментом в проявлении эффекта предэкспонирования в обоих типах световодов является эволюция фотохимических реакций в зависимости от дозы. Имеет место не просто суперпозиция механизмов изменения ПП, удельный вклад которых меняется с экспозицией [13], но также создание на данном этапе экспонирования условий, необходимых для последующего наведения ПП.

Можно предположить, что ключевая роль в цепочке реакций принадлежит центрам окраски в сетке стекла. На первом этапе экспонирования под действием фотохимических или термохимических реакций, сопровождаемых встраиванием водорода в сетку стекла, происходит изменение состояния уже существующих центров окраски или возникновение новых. В результате изменяются спектр поглощения центров окраски, их люминесценция, концентрация парамагнитных дефектов. В конце этого этапа достигается максимальная концентрация промежуточного компонента В.

Результаты многих исследований свидетельствуют о том, что в ГСС в исходном состоянии и после насыщения водородом процесс изменения состояния уже существующих центров окраски и возникновения новых происходит при дозах экспонирования ~ 10 – 100 Дж/см². Так, интегралы полос поглощения для ГКДЦ1, ГКДЦ2, GeE', Ge(1), Ge(2) перестают заметно изменяться уже при дозе облучения ~ 20 Дж/см², в результате чего в состоянии этих дефектов достигается динамическое равновесие [13]. По данным [14], интенсивность люминесценции в полосах 3.2 и 4.3 эВ при возбуждении Хе-лампой с энергией

квантов 5.2 эВ насыщается при дозе ~ 30 Дж/см², суммарная спиновая концентрация GEC- и GeE'-дефектов при возбуждении импульсами KrF-лазера – также при дозе около 30 Дж/см² [14].

По данным [15], интенсивность люминесценции в ГСС без водорода при накачке его второй гармоникой аргонового лазера на длине волны 244 нм достигает насыщения при дозе 100–200 Дж/см². Для световода, насыщенного водородом и затем экспонированного, пик синей люминесценции (400 нм) достигается при дозе ~ 120 Дж/см² [15]. Насыщение в росте полос поглощения GEC при облучении объемных образцов ГСС достигается при дозе ~ 30 Дж/см² [16]. Максимум функции $\Delta n(D_{pe})$ для ГСС в [6] достигается при дозе облучения 60 Дж/см² на длине волны $\lambda = 244$ нм и при дозе 120 Дж/см² на $\lambda = 193$ нм, что примерно соответствует дозе, при которой, в основном, происходит стабилизация состояния центров окраски в ГСС.

При таких дозах экспонирования наведение ПП в ГСС только начинает проявляться. По-видимому, после преобразования центров окраски на первом этапе экспонирования начинается вторая часть процесса – структурная перестройка сетки стекла при участии трансформированных центров окраски. Для проведения этого процесса уже не требуется участия молекулярного водорода. В ходе второго этапа экспонирования происходит относительно медленное (до дозы ~ 10 кДж/см²) разрушение трансформированных центров окраски и монотонное увеличение GeE'-центров, ответственных за структурную перестройку сетки стекла [14]. При разрушении большей их части достигается насыщение дозой зависимости наведенного ПП. Исходные центры окраски являются, таким образом, «пусковым механизмом» относительно медленного процесса наведения ПП.

Учитывая, что максимум функции $\Delta n_{ind}(D_{pe})$ для ФСС много больше, чем для ГСС, можно предположить, что процесс переформирования дефектов в ФСС требует больших доз экспонирования (см. рис.2). Подтверждением тому могут быть полученные нами зависимости концентрации парамагнитных фосфорных кислородно-дырочных центров (ФКДЦ) от дозы экспонирования для исходной фосфорной заготовки без насыщения водородом (рис.3). Видно, что насыщение концентрации происходит при дозе ~ 1 кДж/см². Для сравнения, стабилизация концентрации парамагнитных дефектов в германо-силикатном стекле (GeE' + GEC) наблюдалась при дозе ~ 30 Дж/см² [14].

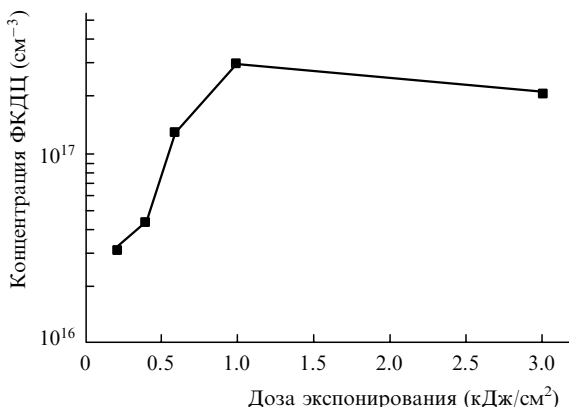


Рис.3. Зависимость концентрации фосфорных кислородно-дырочных центров (ФКДЦ) от дозы экспонирования.

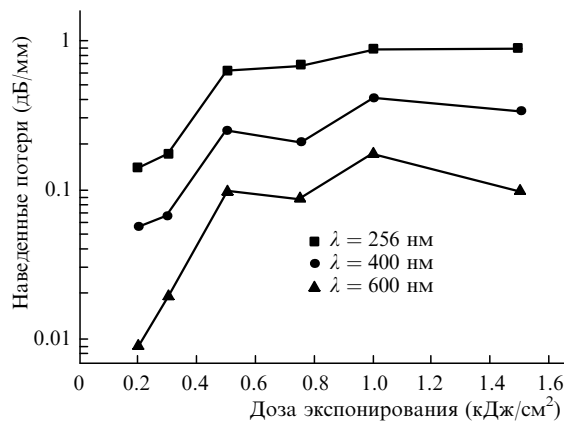


Рис.4. Зависимости наведенных потерь в ФСС-заготовке от дозы экспонирования на длинах волн 600, 400 и 256 нм.

На рис.4 представлены дозные зависимости наведенных потерь в фосфоросиликатной заготовке, насыщенной водородом, при разных длинах волн. Видно, что в широком диапазоне длин волн максимум наведенных потерь (или их стабилизация) достигается при дозе ~ 1 кДж/см². Для ГСС стабилизация пиков поглощения ГКДЦ(1) и ГКДЦ(2), а также рост пиков Ge(1) и Ge(2) достигается при дозе экспонирования ~ 10 – 20 Дж/см² [13].

Пороговый характер роста ПП в ФСС в зависимости от дозы экспонирования (в отличие от роста в ГСС), наблюдаемый в эксперименте, наглядно показывает эволюцию механизмов фотохимических реакций и может быть связан с тем, что для трансформации первоначальных центров окраски в этом световоде необходима большая доза, чем для ГСС. По окончании трансформации центров окраски начинается основная часть процесса наведения ПП в ФСС. Это подтверждается примерно равными дозами экспонирования ФСС, соответствующими окончанию первого этапа экспонирования (~ 1 кДж/см², см. рис.3 и 4) и излому (увеличению прироста) на кривой *I* рис.1,а (~ 0.8 кДж/см²). В ГСС, по-видимому, подобный процесс быстро протекает при малых дозах экспонирования и потому не регистрируется в эксперименте. Отсутствие порогового характера роста в ФСС на втором этапе, после удаления водорода, свидетельствует об отсутствии реакций, ведущих к трансформации центров окраски.

Высказанные предположения о природе эффекта предэкспонирования могут объяснить двухступенчатый характер наведения ПП, а также наведение ПП после завершения преобразования центров окраски в ходе экспонирования. Однако они не способны дать объяснение монотонной зависимости от дозы предэкспонирования, которая зафиксирована для ASMF28 при облучении на длине волны 248 нм. Можно предположить, что этот вид зависимости определяется не разрушением созданных на первом этапе центров окраски, а непрерывным изменением структуры стекла в ходе экспонирования на втором этапе. При этом на первом этапе создаются лишь условия прохождения фотохимической реакции второго этапа. Модель для такого типа процессов была предложена в работе [16].

В [16] наведение ПП в ГСС объясняется двухфотонными процессами, в результате чего появляются германиевые электронные центры GEC и дефекты типа SH

(self-trapped hole). В результате термической релаксации ГЕС-центры трансформируются в GeE' -центры с последующей перестройкой локальной структуры стекла и наведением ПП. При этом дефект STN, являющийся по сути дыркой, локализованной на одном из узлов атомов кислорода, рекомбинирует с ближайшим электронным центром так, что данный узел вновь становится ловушкой для дырок. Цикл повторяется для последующего двухфотонного процесса рождения центров ГЕС и STN.

В [16] отмечается, что, возможно, важную роль в этом циклическом процессе играют Ge^{2+} -дефекты, способствующие восстановлению ловушек для дырок из STN. Таким образом, если на первом этапе в присутствии водорода происходит рождение Ge^{2+} , то на втором этапе, после удаления водорода, эти дефекты могут способствовать возникновению циклического процесса, обусловленного двухфотонным поглощением квантов света. Подтверждением этому могут быть результаты работы [17], в которой исследована зависимость наведенного ПП для стандартного телекоммуникационного световода SMF28 при экспонировании его Krf-лазером от плотности излучения для фиксированной дозы экспонирования. В этих условиях увеличение плотности экспонирования привело к росту наведенного ПП, что подтверждает наличие двухфотонного процесса. Существование двухфотонных процессов в низколегированных ГСС типа SMF28 в отсутствие водорода (в отличие от высоколегированных световодов) уже подтверждено экспериментально, хотя и не для предэкспонированных образцов [18].

5. Выводы

Таким образом, в ФСС с малыми потерями, изготовленном MCVD-методом, обнаружен эффект предэкспонирования. В результате проведенных исследований выявлены следующие особенности механизма наведения ПП в таких световодах:

– зависимость наведенного ПП от дозы предэкспонирования имеет максимум, подобный обнаруженному для ГСС. Это свидетельствует о двухэтапном процессе наведения ПП, в котором участвуют три химических компонента, что подобно происходящему в ГСС, насыщенном водородом. Максимальная эффективность наведения ПП в двухэтапном процессе достигается при дозе предэкспонирования ~ 2 кДж/см²;

– соответствие дозы экспонирования ФСС, при которой завершается изменение состояния точечных дефектов, дозе, при которой завершается первый этап экспонирования и достигается максимум в концентрации промежуточного компонента В. Подобное соответствие выявлено нами при анализе литературных данных и для ГСС. По-видимому, эволюция состояния различных точечных дефектов в процессе экспонирования определяет смену этапов наведения ПП и носит общий характер для разных материалов;

– отсутствие максимума в зависимости наведенного ПП от дозы предэкспонирования для ГСС (рис.2), что может объясняться циклической фотохимической реакцией. Принцип этой реакции основан на двухфотонном поглощении при наличии точечных дефектов, создаваемых на начальном этапе экспонирования [16].

Авторы благодарят В.М.Машинского и А.О.Рыбалтовского за полезные обсуждения эффекта предэкспонирования и возможных механизмов его осуществления, а также за ряд ценных замечаний по тексту публикации.

1. Dianov E.M. et al. *Electron. Lett.*, **33**, 1542 (1997).
2. Dianov E.M. et al. *Techn. Digest OFC'99* (Stuart, Florida, 1999, PD25-1 – PD25-3).
3. Dyer P., Farley R., Giedl R., Byron K. *Electron. Lett.*, **30**, 1133 (1994).
4. Semenov S., Rybalovsky A., Larionov Y., Bubnov M., Dianov E. *Techn. Digest Bragg Gratings, Photo-sensitivity, and Poling in Glass Waveguides Conf.* (Stuart, Florida, 1999, ThE8-1).
5. Canning J., Hu P-F. *Techn. Digest Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides Conf.* (Stressa, Italy, 2001, BThA6-1).
6. Canning J. *Opt. Fiber Technol.*, **6**, 275 (2000).
7. Carter A.L.G., Sceats M.G., Poole S.B., Hanna J.V. *Techn. Digest OFC'94* (San Jose, California, 1994, TuB3).
8. Malo B. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 394 (1994).
9. Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И., Фролов А.А. *Квантовая электроника*, **24**, 805 (1997).
10. Денисов Е.Т., Сакисов О.М., Лихтенштейн Г.И. *Химическая кинетика* (М.: Химия, 2000).
11. Rybalovsky A., Larionov Y., Semenov S., Plotnichenko V., Krukova E., Pyrkov Y., Bubnov M., Dianov E. *Techn. Digest Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides Conf.* (Stresa, Italy, 2001, BthA3-1).
12. Griscom D.L., Gingerich M.E., Friebele E.J. *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 1019 (1993).
13. Dianov E., Neustruev V. *Proc. SPIE*, **4083**, 132 (2000).
14. Nishii J. In *Lecture Proc. of Euro-Summer School on Photosensitivity in Optical Waveguides and Glasses (POWAG)* (Universite de Paris Sude, France, 2000).
15. Kuswanto H., Goutaland F., Boukenter A., Ouerdane Y. *Techn. Digest Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides Conf.* (Stressa, Italy, 2001, BThc26-1).
16. Essid M., Brebner J.L., Albert J.A., Awazu K. *J. Appl. Phys.*, **84**, 4193 (1998).
17. Poumellec B. et al. *J. Opt. Soc. Amer. B* (to be published).
18. Albert J., Malo B., Hill K.O. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3529 (1995).