

Дефекты фосфоросиликатного стекла, экспонированного излучением на длине волны 193 нм

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

Проведены измерения наведенного поглощения (НП) в спектральных диапазонах 140–850 и 1000–1700 нм в ненасыщенном водородом фосфоросиликатном стекле (ФСС) до и после его экспонирования на длине волны 193 нм. Показано, что в диапазоне 140–300 нм полосы НП не совпадают с полосами, зафиксированными ранее при экспонировании ФСС рентгеновским излучением. Сделано предположение, что возникновение фоторефрактивного эффекта в ФСС связано не с дефектами, обуславливающими обнаруженные полосы НП, а с индуцированными изменениями сетки стекла.

Ключевые слова: фоточувствительность, фосфоросиликатное стекло, дефекты стекла, наведенный показатель преломления, эксимерный лазер.

1. Введение

Фосфоросиликатные световоды (ФСС) являются перспективным материалом для ВКР- (рамановских) конверторов и оптических усилителей [1]. К сожалению, сравнительно низкая фоточувствительность ФСС затрудняет их использование в волоконных линиях связи, поскольку усложняет изготовление в них решеток показателя преломления (ПП). В связи с этим изучение механизма фоточувствительности ФСС с целью ее повышения является несомненно актуальным.

Фотоиндуцированный эффект (изменение ПП под действием УФ излучения) вначале был обнаружен в германосиликатном стекле. Затем было установлено, что он существует и в других силикатных стеклах, в частности в ФСС. Однако в ФСС этот эффект был обнаружен только в образцах, насыщенных водородом, и только при экспонировании их на длине волны 193 нм с помощью эксимерных лазеров [2]. И лишь спустя 10 лет [3] было показано, что заметный фотоиндуцированный эффект в ФСС возникает и в не насыщенных водородом образцах, если экспонирование производится лазером при относительно малой длительности импульса (6–8 нс) и большой плотности энергии (300 мДж/см²), в результате, повидимому, двухфотонного поглощения света. Максимальное достигнутое в [3] значение наведенного ПП (НПП) составило 5×10^{-4} при дозе экспонирования около 5 кДж/см².

Считается, что в легированных кварцевых стеклах фотоиндуцированный эффект возникает из-за наличия в них дефектов. Существование внутри запрещенной зоны уровней энергии, определяемых исходными дефектами, дает возможность эффективно поглощать падающий свет в однофотонном процессе. Кроме того, присутствие в стек-

ле исходных дефектов вызывает появление в нем новых или модифицированных дефектов, а также перестройку структуры стекла, в результате чего изменяется ПП.

Представление о наведенных точечных дефектах в ФСС (не насыщенных водородом) было получено еще в начале 1990-х годов при его экспонировании рентгеновскими лучами [4]. Удалось выявить четыре типа фосфорных дефектов в диапазоне энергий 0.5–6.2 эВ. Эти типы дефектов упоминаются и обсуждаются практически во всех публикациях, посвященных исследованию дефектов ФСС, экспонированного также УФ излучением. Однако вопрос о тождественности дефектов, возникающих в ФСС под действием этих двух видов экспонирующего излучения, и о их связи с фоторефрактивным эффектом остается открытым до сих пор.

Свой вклад в понимание участия фосфорных дефектов в наведение ПП внесла работа [5], в которой исследовались насыщенные и не насыщенные водородом стекла, экспонированные излучением на $\lambda = 193$ нм. Было подтверждено существование двух из четырех фосфорных дефектов, обнаруженных в [4] в не насыщенном водородом ФСС. Кроме того, в [5] были представлены модели дефектов, образующихся в ФСС при насыщении его водородом и ответственные, по мнению авторов этой работы, за фоторефрактивный эффект.

Изменениям структуры не насыщенного водородом ФСС под действием УФ излучения на $\lambda = 248$ нм посвящены работы [6, 7]. Однако эти изменения не сопровождаются наведением ПП. Наблюдение фоторефрактивного эффекта в не насыщенном водородом ФСС [3] вновь пробуждает интерес к исходным и модифицированным дефектам этого стекла и к механизму их участия в наведении ПП.

В связи с этим целью настоящей работы было изучение образования дефектов ФСС в результате экспонирования его УФ излучением на $\lambda = 193$ нм. Измерения проводились в тех же спектральных диапазонах, что и в [4], а также в области вакуумного УФ; в работе [4] исследования в этой области отсутствовали из-за сильного рассеяния света стеклом после его облучения рентгеновским излучением.

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: vvv1@bigfoot.com; victor@fo.gpi.ru

2. Условия проведения эксперимента

В качестве объектов исследования мы использовали объемные и волоконные образцы фосфоросиликатного стекла с низкими потерями, полученные MCVD-методом [8]. Объемные образцы представляли собой пластинки стекла толщиной 0.2–1 мм, вырезанные из заготовок для вытяжки световодов перпендикулярно их оси. Молярное содержание оксида фосфора в сердцевине всех исследованных образцов составляло ~12%. Размер сердцевины в объемных образцах был равен 0.4–1 мм. Волоконные световоды вытягивались из заготовок, аналогичных используемым для изготовления объемных образцов. Основные параметры волоконных световодов: разность ПП сердцевины и оболочки $\Delta N = 0.01$, длина волны отсечки $\lambda_c = 1.1$ мкм.

Экспонирование образцов проводилось эксимерным лазером CL5000 [9]. Длина волны излучения лазера была равна 193 нм, длительность импульса составляла 6–7 нс, плотность энергии в импульсе равнялась 25–150 мДж \times см⁻². Частота следования импульсов, составляющая, как правило, 10 Гц, в отдельных случаях изменялась от 5 до 50 Гц. Измерение наведенного поглощения (НП) в волоконных образцах проводилось на спектроанализаторе AQ6317 (ANDO).

Для измерения спектров пропускания в УФ диапазоне объемных образцов до и после облучения мы использовали спектрофотометр LAMBDA 900 (Perkin-Elmer), а также вакуумный спектрофотометр VUVaS 1000 (McPherson). Измерения на первом спектрофотометре начинались со 190 нм, на втором – со 116 нм. В области длин волн свыше 200 нм мы могли сопоставлять спектры пропускания, полученные обоими приборами. Промежутки времени между экспонированием образца и измерением его спектров составляли от нескольких часов до нескольких дней, между последовательными актами экспонирования – от нескольких дней до недели. На нескольких объемных образцах в исходном состоянии и после экспонирования были проведены измерения ЭПР-спектров.

3. Результаты исследования

Типичные спектры НП объемного образца ФСС после экспонирования его дозами 200 и 400 Дж/см², измеренные на спектрофотометре LAMBDA 900, представлены на рис.1. Видно, что экспонирование приводит к появлению пиков поглощения с максимумами вблизи 2.3, 2.6 и 3.3 эВ; эти значения примерно соответствуют приведенным в [4]. Подобный по форме спектр поглощения был получен и в [5] при экспонировании эксимерным лазером с $\lambda = 193$ нм образца не насыщенного водородом ФСС с молярным содержанием окиси фосфора 1.7%. Однако в [5] в спектре НП пик поглощения с энергией 2.6 эВ отсутствовал.

Спектры поглощения того же образца, полученные с помощью вакуумного спектрофотометра, представлены на рис.2. В диапазоне энергий 6.3–7.3 эВ виден резкий рост поглощения в ФСС (сердцевине) по сравнению с кварцевой оболочкой (кривые 1 и 3 соответственно; кривая 5 представляет собой разность кривых 3 и 1). Появление пика поглощения с энергией 6.9 эВ и заметный рост поглощения в пике с энергией в максимуме 7.6 эВ приводят к смещению края фундаментального поглощения в ФСС в длинноволновую сторону. Поглощение, которое

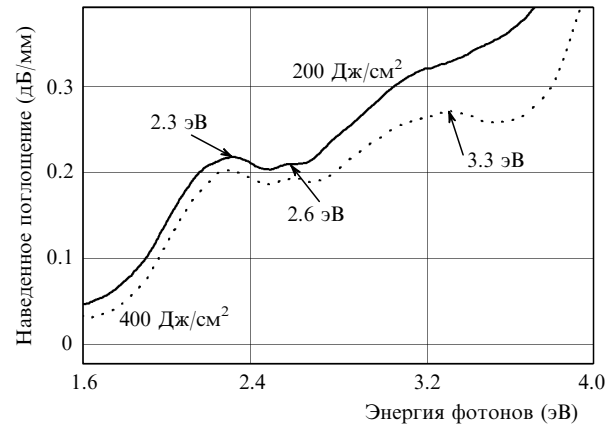


Рис.1. Спектры наведенного поглощения ФСС для доз экспонирования 200 и 400 Дж/см² (стрелками указано положение пиков НП).

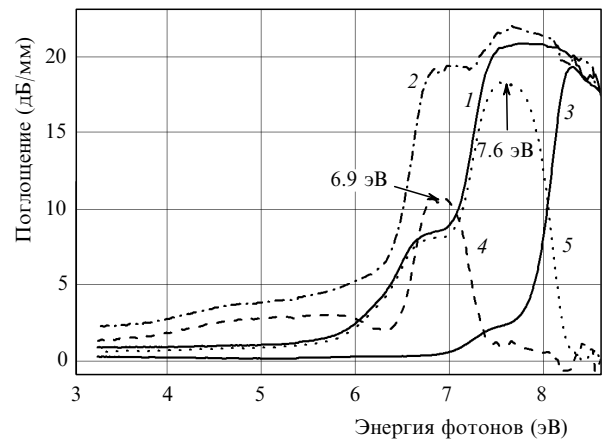


Рис.2. Спектры поглощения ФСС (сердцевина) и оболочки (кварцевое стекло), полученные с помощью вакуумного спектрофотометра (стрелками указано положение пиков НП):

1 – исходное поглощение в сердцевине; 2 – поглощение в сердцевине после облучения дозой 400 Дж/см²; 3 – исходное поглощение в оболочке; 4 – наведенное поглощение; 5 – разность значений поглощения в сердцевине и оболочке.

возникает в результате экспонирования образца дозой 400 Дж/см², отображено кривой 2. Возникшее после указанной дозы НП показано кривой 4. Видно, что НП в ФСС проявляется в виде широкой полосы в диапазоне 4–6 эВ и пика с максимумом 6.9 эВ.

Более детально полоса НП в диапазоне 4–6 эВ изображена на рис.3. Она имеет сложную структуру, в которой можно предположить существование по крайней мере двух максимумов. Пики этих максимумов приходятся на 4.7 и 5.8 эВ, их ширина составляет ~1.1 эВ.

На рис.4 представлены ИК спектры поглощения, измеренные после экспонирования фосфоросиликатного световода двумя дозами облучения. Видно, что с ростом дозы увеличивается пик НП с максимумом вблизи 0.8 эВ ($\lambda = 1.57$ мкм), что примерно соответствует энергии пика НП (0.79 эВ) в [4]. Ширина этого пика, по нашим данным, составляет ~0.6 эВ. Пик НП с энергией 1.07 эВ ($\lambda = 1.16$ мкм), зафиксированный в [4], присутствует на рис.4 в искаженном виде – без выраженного максимума вблизи энергии 1.07 эВ; его ширина заметно меньше значения 0.32 эВ, указанного в [4], причем с ростом дозы форма пика практически не меняется.

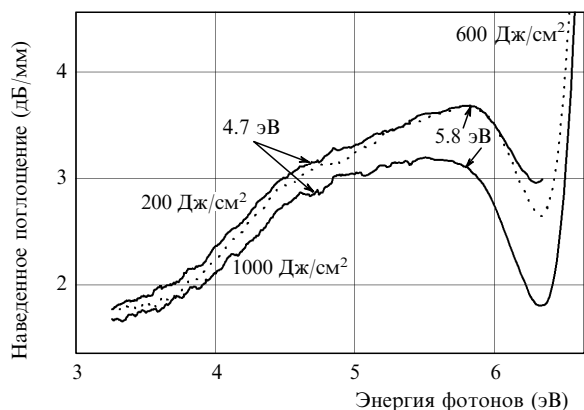


Рис.3. Спектры наведенного поглощения ФСС в диапазоне энергий 4–6 эВ для доз экспонирования 200, 600 и 1000 Дж/см².

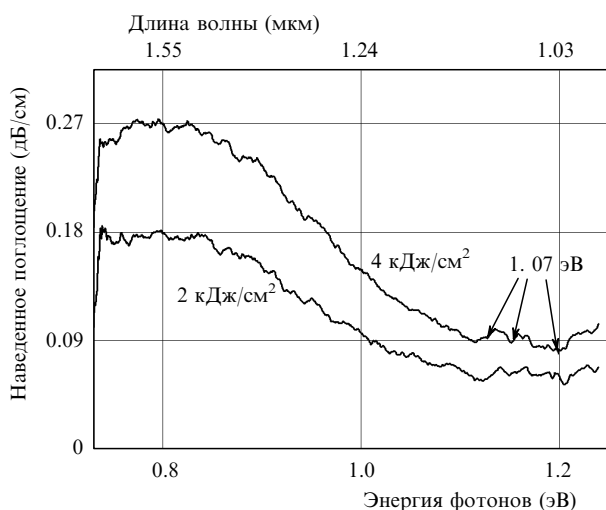


Рис.4. ИК спектры наведенного поглощения ФСС в волоконном образце (стрелками указано положение пика НП искаженной формы) для доз 2 и 4 кДж/см².

4. Обсуждение результатов

Сравним полученные нами результаты с результатами работы [4]. Различия в них обусловлены воздействием на образцы излучением с отличающимися длинами волн, различными методами изготовления объемных образцов, а также условиями измерения спектров после экспонирования. В [4] объемные образцы ФСС получали плазмохимическим методом (распылением и осаждением на заготовку частиц соответствующего химического состава в кислородной плазме), в нашей работе формирование заготовок осуществлялось с помощью MCVD-технологии (молярное содержание окиси фосфора в наших образцах (12 %) и в [4] (10 %) было примерно одинаковым). Пики НП в [4] определялись по разности спектров, полученных сразу после экспонирования и после отжига образцов при температуре 823 К. Экспонирование образцов и измерение спектров в [4] проводилось при температуре 80 К. Условия экспонирования и измерения спектров для наших образцов соответствовали нормальным (т. е. условиям записи брэгговских решеток в волоконных световодах), а НП определялось по разности спектров поглощения после облучения и до него.

Тем не менее, несмотря на указанные различия в подготовке и проведении экспериментов, для некоторых пиков НП наши результаты хорошо соответствуют дан-

ными, представленным в [4]. Так, зафиксированные нами пики НП с максимумами 2.3, 2.6 и 3.3 эВ довольно близки по положению пикам с максимумами 2.2, 2.5 и 3.1 эВ, представленным в [4]. Близки и ширины сопоставляемых пиков с максимумами 2.3 и 3.3 эВ. Энергии и ширины пиков, а также типы дефектов приведены в табл.1. Возникновение указанных пиков НП в [4] связывается с образованием РОНС – фосфорного кислородно-дырочного дефекта. Появление наведенных дефектов РОНС при облучении подтверждают и полученные нами данные ЭПР-спектроскопии. Указанный дефект в [4] вызывает также появление пика с максимумом 5.3 эВ. К сожалению, из-за неоднозначности разложения полосы НП в диапазоне 4–6 эВ по четырем гауссовым составляющим мы не смогли надежно подтвердить его наличие в наших спектрах (см. рис.3).

Как уже отмечалось, в диапазоне энергий 4–6 эВ в наших спектрах НП обнаруживаются по крайней мере два пика, один из которых (с максимумом 5.8 эВ) отсутствует в [4], а другой (с максимумом 4.7 эВ), близок к пику с энергией 4.8 эВ в [4]. Последний пик, однако, должен в наших данных отсутствовать, поскольку по результатам ЭПР-спектроскопии в не насыщенном водородом ФСС отсутствуют дефекты типа Р4 (см.[4]), вызывающие поглощение фотонов с этой энергией [5]. Относительно близко от пика с максимумом 4.8 эВ в [4] располагается пик с максимумом 4.5 эВ (см.табл.1). Дефект типа Р2, вызывающий его появление, также должен отсутствовать в наших не насыщенных водородом образцах [5]. При разложении указанной широкой полосы НП в диапазоне 4–6 эВ по трем гауссовым составляющим обнаруживается, кроме указанных пиков с максимумами 4.7 и 5.8 эВ, еще относительно небольшой и узкий (0.4 эВ) пик НП с максимумом 5.1 эВ. Однако при разложении широкой полосы по четырем гауссовым составляющим (с учетом предполагаемого пика с максимумом 5.3 эВ) параметры всех пиков надежно определить не удастся.

В области энергий более 6 эВ в наших данных обнаруживается пик НП с энергией 6.9 эВ и шириной ~0.7 эВ (см.рис.2 и табл.1); близкий пик НП в [4] имеет энергию

Табл.1.

E (эВ) [4] (E (эВ), наст. раб.)	Ширина пика (эВ) [4] (тип дефекта [4])	Ширина пика (эВ) (наст. раб.)	Ширина пика (эВ) (тип дефекта) [10])
0.45	0.8 (–)	–	–
0.79	0.29 (P1)	~0.6	–
1.07	0.32 (–)	0.01 – 0.04	–
2.2 (2.3)	0.35 (РОНС)	~0.4	–
2.5 (2.6)	0.63 (РОНС)	~1.3	–
3.1 (3.3)	0.73 (РОНС)	~0.7	–
4.5 (–)	1.27 (P2)	–	–
4.8 (4.7)	0.41 (P4)	~1.1	1.05 (NВОНС)
5.05 (5.1)	0.88 (E'(P))	~0.4 ?	0.3 (КДЦ2: $S_1 - S_0$)
5.3 (5.0–5.3)	0.74 (РОНС)	?	–
– (5.8)	– (–)	~1.1	0.8(E')
7.0 (6.9)	2.76 (–)	~0.7	0.4 (КДЦ2: $S_1 - S_0$)

Примечание: прочерк, соответствующий типу дефекта, означает, что дефект отсутствует или не идентифицирован; РОНС – фосфорный кислородно-дырочный центр; P1, P2 и P4 – фосфорные типы дефектов, не имеющих названия (см. [4]); NВОНС – немостиковый кислородно-дырочный центр; E(P)' – E' – центр в ФСС вблизи атома фосфора; ширина пика измерена на полувысоте; $S_{0,1,2}$ – синглетные уровни дефекта; вопросительный знак – ненадежный результат при разложении пика по гауссовым составляющим; E – энергия пика.

7 эВ и ширину 2.76 эВ. Большое различие в ширинах этих пиков свидетельствует, видимо, о различии порождающих их дефектов.

Из рис.4 следует, что ширина пика с максимумом вблизи 0.8 эВ ($\lambda = 1.57$ мкм) составляет примерно 0.6 эВ против 0.29 эВ в [4]. По данным ЭПР-спектроскопии в [5] дефект типа P1, вызывающий появление этого пика, должен присутствовать и в нашем не насыщенном водородом ФСС. Для выявления причины несовпадения ширин рассматриваемых пиков НП необходимы дополнительные исследования.

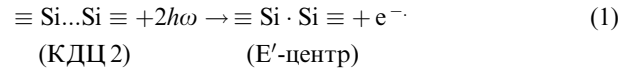
Введение фосфора в кварцевое стекло, как видно из рис.2, приводит к появлению двух пиков с максимумами 7.6 и 6.9 эВ и ширинами ~ 0.9 и 0.7 эВ соответственно. По своему положению и ширине они близки к кремниевым кислородно-дефицитным центрам КДЦ 1 и КДЦ 2 в кварцевом стекле с энергией 7.6 и 6.9 эВ при ширине 0.62 и 0.4 эВ [10]. Для центра КДЦ 2 пик поглощения с максимумом 6.9 эВ соответствует синглетному переходу $S_0 - S_2$. При этом, однако, должен существовать и синглетный переход $S_0 - S_1$ с пиком поглощения на 5.05 эВ, но в спектрах поглощения, полученных нами до облучения (см. рис.2), указанный пик отсутствует. Последнее можно объяснить, предположив, что в заготовках ФСС большая часть кремниевых КДЦ 2 исходно связана с атомами фосфора, в результате чего могут образовываться фосфорные кислородно-дырочные центры (ФКДЦ), описанные в [11]. В этой работе показано, что для ФКДЦ пик с максимумом 6.9 эВ в спектре поглощения ФСС не сопровождается появлением пика с максимумом 5.05 эВ.

Каким же образом происходит образование КДЦ в ФСС, которые затем могут участвовать в формировании ФКДЦ? Известен факт образования КДЦ 2 в сердцевине германосиликатной заготовки [12]. Это обусловлено удалением части атомов кислорода из поверхностного слоя заготовки в процессе ее схлопывания. Возможно, подобный (но более сложный) процесс происходит и в фосфоросиликатных заготовках в ходе их схлопывания.

Можно предположить, что дефекты КДЦ 2, отсутствующие в исходном состоянии, все же образуются в результате экспонирования ФСС. Выше упоминалось, что разложение полосы НП в диапазоне 4–6 эВ (см. рис.3) по трем гауссовым составляющим приводит к обнаружению относительно неглубокого пика поглощения на 5.1 эВ, что может быть косвенным подтверждением возникновения этих дефектов в экспонированных образцах. Однако, согласно [10], сила осциллятора для пика, определяемого вторым синглетным переходом на 6.9 эВ, лишь примерно в 2 раза больше, чем для пика, определяемого первым переходом на 5.05 эВ. В наших же данных отношение глубин указанных пиков НП превышает 10. Для объяснения этого различия можно использовать предположение об образовании ФКДЦ в ходе экспонирования ФСС вместе с КДЦ 2.

Обнаруженным нами пикам НП с максимумами 4.7 и 5.8 эВ могут соответствовать, согласно [10], дефекты кварцевого стекла – центр NВОНС (немостиковый кислородно-дырочный центр) и E' -центр, ширины которых составляют 1.05 и 0.8 эВ соответственно, что близко к значениям, полученным в наших экспериментах (см. рис.3).

Генерация E' -центров в наших образцах является важным свидетельством возникновения КДЦ 2 в ФСС, т.к. согласно [10] имеет место следующая реакция:



По-видимому, образование части E' -центров является результатом разрушения наведенных в ходе экспонирования КДЦ 2. Однако можно предположить, что пик с максимумом 5.8 эВ может возникнуть и вследствие распада ФКДЦ при разрушении относительно слабой связи между атомами фосфора и КДЦ 2, которая образуется при формировании ФКДЦ.

Подтверждением вовлеченности дефектов с максимумами пиков НП 4.7, 5.8 и 6.9 эВ в общие фотохимические реакции в сетке кварцевого стекла служат дозные зависимости изменения наведенного поглощения в этих пиках, представленные на рис.5. Видно, что в пиках с энергией 4.7 и 5.8 эВ изменения НП происходят коррелированно, а в пике с энергией 6.9 эВ – антикоррелированно по отношению к двум первым пикам. Корреляцию первых кривых можно объяснить одновременным созданием NВОНС- и E' -центров при разрушении Si–O–Si-связей в результате двухфотонного поглощения света, а антикорреляцию третьей кривой со второй (и, косвенно, с первой) – разрушением КДЦ 2 и ФКДЦ также в ходе двухфотонного поглощения света последними.

Но действительно ли рост НП в указанных выше пиках определяется двухфотонным поглощением? Дозные зависимости (рис.5) получены при экспонировании образца излучением с плотностью 50 мДж/см². Подобные же дозные зависимости и корреляцию (соответственно и антикорреляцию) кривых мы обнаружили также при плотности экспонирования 100 мДж/см². В то же время при плотности экспонирования 25 мДж/см² пик НП с энергией 5.8 эВ отсутствует, а дозные зависимости НП с максимумами 4.7 и 6.9 эВ коррелируют между собой (в отличие от соответствующих кривых на рис.5). Таким образом, формирование пика НП с энергией 5.8 эВ и коррелированность рассматриваемых дозных зависимостей действительно связаны с двухфотонным поглощением света в ФСС.

Любопытными особенностями дозных зависимостей НП, представленных на рис.5, является резкий рост НП во всех пиках при первой минимальной дозе экспонирования 200 Дж/см² и квазипериодическое поведение каждой из кривых в области доз до 1 кДж/см². Нам неизвест-

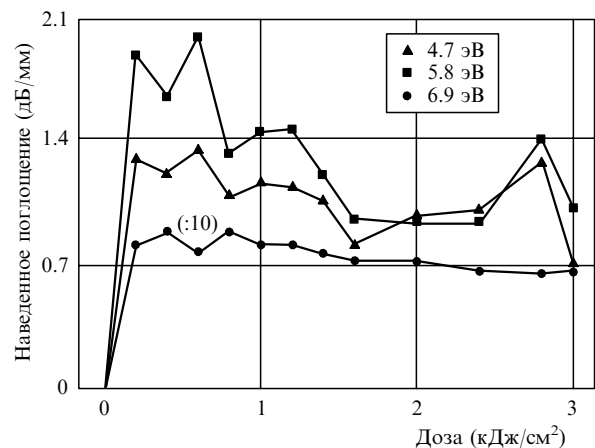


Рис.5. Дозные зависимости изменения наведенного поглощения в пиках с энергиями 4.7, 5.8 и 6.9 эВ (длины волн 270, 214 и 180 нм соответственно). Масштаб нижней кривой по ординате уменьшен в 10 раз.

но подобное изменение пиков НП (и концентрации дефектов, с которыми эти пики связаны) в стеклах в результате воздействия монотонно возрастающей дозы экспонирования. Изменения такого типа, по-видимому, возможны, если предположить, что существует воздействие на точечные дефекты со стороны сетки стекла, изменения которой определяются релаксационными явлениями, происходящими в ней в ходе экспонирования (изменениями структуры стекла в результате резкого изменения механических напряжений). Возможно, что и протекание фотохимических процессов, предложенных выше для объяснения корреляции кривых на рис.5, управляется состоянием сетки стекла.

Представляется важным вопрос о связи обнаруженных нами пиков НП с наведением показателя преломления в ФСС. Известно [3], что дозовая зависимость наведенного ПП в не насыщенном водородом ФСС является монотонно возрастающей функцией в области по крайней мере до 5 кДж/см^2 . Уже по этой причине пики НП на рис.5 (и, следовательно, соответствующие точечные дефекты) не могут быть непосредственно связаны с наведением ПП. С другой стороны, фосфорные дефекты ФСС (P1, P2, P4 и РОНС), обнаруженные в [4] (см.табл.1), имеют энергию пиков не более 5.3 эВ, а значит могут разрушаться при однофотонном поглощении в случае воздействия квантов с энергией 6.4 эВ (с длиной волны 193 нм). По этой причине они не могут быть непосредственно ответственны за наведение ПП в ходе двухфотонного поглощения. По-видимому, определяющая роль в наведении ПП в не насыщенном водородом ФСС принадлежит сетке стекла.

5. Выводы

Образование дефектов в не насыщенном водородом ФСС, изготовленном по МСVD-технологии, при действии на него излучения с длиной волны 193 нм заметно отличается от образования дефектов в ФСС, полученном в [4], при воздействии рентгеновского излучения. Наибольшие различия выявлены в области спектра с энергией квантов более 4 эВ (длина волны менее 0.3 мкм).

Обнаружены широкая полоса наведенного поглощения в диапазоне 4–6 эВ, а также пики с максимумами 6.9 и 7.6 эВ, которые возникают в ФСС еще до экспонирования и предположительно определяются дефектами кварцевого стекла КДЦ 1 и ФКДЦ, появляющимися после введения в кварцевое стекло окиси фосфора. НП в пике с максимумом 7.6 эВ почти не изменяется в ходе экспонирования ФСС, тогда как в пике с максимумом 6.9 эВ оно резко увеличивается в самом начале экспонирования, а в дальнейшем убывает. По нашим представлениям, эти изменения связаны с вариациями концентрации дефектов КДЦ 2 и ФКДЦ.

Широкая полоса НП (4–6 эВ) может быть разложена на гауссовы составляющие с максимумами 4.7, 5.1 и 5.8 эВ, причем две последних возникают только в результате двухфотонного поглощения. Амплитуда пика с максимумом 5.1 эВ значительно меньше, чем у двух других. Рост пиков НП с максимумами 4.7 и 5.8 эВ в ходе двухфотонного поглощения, по нашему предположению, определяется формированием кварцевых дефектов – неомостинового кислородно-дырочного и E' -центров соответ-

венно. Изменения глубины пика НП с максимумом 6.9 эВ в ходе экспонирования антикоррелируют с поведением глубины пиков с максимумами 4.7 и 5.8 эВ. Это свидетельствует о том, что дефекты, отвечающие указанным пикам, вовлечены в одну или несколько связанных между собой фотохимических реакций, проходящих в ФСС в ходе двухфотонного поглощения света.

Выявленная нами широкая полоса НП в диапазоне 4–6 эВ отличается от подобной полосы в [4], поскольку последняя образована фосфорными дефектами P2 и P4, которые, по данным ЭПР-исследований, отсутствуют в наших образцах ФСС. В целом отличия обнаруженных нами пиков НП в области более 4 эВ от пиков в [4] настолько значительны, что для надежной идентификации определяющих их дефектов требуются дополнительные исследования.

Пики НП с энергиями менее 4 эВ, зафиксированные в [4], в большей степени соответствуют выявленным нами пикам, хотя существуют и некоторые различия в их параметрах. Надо полагать, что и в наших образцах эти пики определяются фосфорными дефектами P1 и РОНС.

Хотя динамика изменения точечных дефектов в ФСС с энергией возбуждения более 4 эВ определяется двухфотонным поглощением (т.е. так же, как и рост ПП), характер этих изменений и дозные зависимости ПП кардинально различаются. Поэтому указанные дефекты не могут быть непосредственным источником наведенного ПП. Поскольку изменения в обнаруженных в [4] фосфорных дефектах ФСС не связаны с двухфотонным поглощением, они также не могут быть непосредственно ответственны за наведение ПП. По-видимому, наведение показателя преломления в ФСС определяется изменением структуры сетки стекла.

Авторы благодарят В.М.Машинского за полезные обсуждения и помощь в проведении работ на вакуумном спектрофотометре, С.Е.Мосалеву и В.Ф.Лебедеву за проведение экспериментов на спектрофотометрах, А.А.Рыбалтовского за подготовку объемных образцов ФСС для проведения исследований.

Работа поддержана РФФИ (грант № 05-02-16207а).

1. Egorova O., Bubnov M., Bufetov I., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4216**, 32 (2000).
2. Malo B., Albert J., Bilodeau F., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 394 (1994).
3. Larionov Yu., Rybaltovsky A., Kryukova E., et al. *Techn. Dig. Conf. 'Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides'* (Bath, UK, 2004, MC4, pp. 46–48).
4. Griscom D.L., Friebele E.J., Long K.L. *J. Appl. Phys.*, **54** (7), 3743 (1983).
5. Hosono H., Kajihara K., Hirano M., et al. *J. Appl. Phys.*, **91** (7), 4121 (2002).
6. Plotnichenko V., Sokolov V., Kryukova E., et al. *J. Non-Cryst. Sol.*, **270**, 20 (2000).
7. Plotnichenko V., Sokolov V., Koltashev V., Dianov E. *J. Non-Cryst. Sol.*, **306**, 209 (2002).
8. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., et al. *Electron. Lett.*, **33** (18), 1542 (1997).
9. Атежев В.В., Вартапетов С.К., Жуков А.И. и др. *Квантовая электроника*, **33** (8), 689 (2003).
10. Skuja L. *J. Non-Cryst. Sol.*, **239**, 16 (1998).
11. Рыбалтовский А.А., Соколов В.О., Плотниченко В.Г. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 388 (2007).
12. Dianov E., Mashinsky V., Neustruev V., et al. *Opt. Fiber Technol.*, **3**, 77 (1997).