

Фоточувствительность эрбиевых композитных фосфоросиликатных световодов к лазерному излучению с длиной волны 193 нм

А.А.Рыбалтовский, С.А.Васильев, О.В.Бутов, О.Н.Егорова, С.Г.Журавлев, С.Л.Семенов, Б.И.Галаган, С.Е.Сверчков, Б.И.Денкер

Представлены и проанализированы результаты исследований фотоиндуцированного изменения показателя преломления в сердцевине эрбиевого композитного фосфоросиликатного световода при импульсном УФ облучении на длине волны $\lambda = 193$ нм, а также при последующем термическом отжиге. Показано, что предварительное насыщение композитного световода молекулярным водородом значительно увеличивает его фоточувствительность. Анализ кинетик термического отжига позволил выявить фундаментальные различия механизмов фоточувствительности в насыщенном водородом световоде и в световоде, не подвергнутому водородной обработке. Проведены исследования спектров начального и фотоиндуцированного поглощения фосфоросиликатного стекла. Установлено, что в УФ диапазоне наведенное поглощение определяется в основном вкладом интенсивной полосы поглощения фотоиндуцированных фосфорных электронных центров PO_2 с максимумом при 4.7 эВ ($\lambda = 260$ нм).

Ключевые слова: композитный волоконный световод, фосфатное стекло, волоконная брэгговская решетка, фоточувствительность, наведенный показатель преломления, центры окраски.

1. Введение

Волоконные световоды (ВС), легированные редкоземельными элементами, широко используются в качестве активной среды волоконных лазеров и усилителей разных типов. Одним из наиболее важных активных ионов является ион эрбия. Этот ион имеет широкую полосу оптического усиления в области минимальных потерь кварцевых ВС (1.55 мкм), поэтому незаменим в телекоммуникационных системах. Для создания эффективных оптических устройств часто требуется высокая концентрация ионов эрбия в сердцевине активного ВС, однако ее увеличение в кварцевом стекле, как правило, ограничено вследствие кластеризации ионов. Для повышения степени растворимости ионов эрбия стекло при изготовлении может быть дополнительно легировано оксидом фосфора [1], предельная концентрация которого при производстве стекла стандартными методами легирования, такими как MCVD, также ограничена. В работе [2] была показана возможность создания ВС с фосфатной сердцевиной из стекла SELG (strong erbium laser glass) [3], внедренной в кварцевую оболочку. Этот новый тип композитного ВС (КВС) обеспечивает возможность введения некластеризованных ионов эрбия с высокой концентрацией в сердцевине при сохранении совместимости со стандартными волоконно-оптическими устройствами, что необходимо

для создания эффективных волоконных лазерных систем. Дополнительным важным достоинством КВС является наличие значительной фоточувствительности (стабильного изменения показателя преломления) при облучении на длине волны 193 нм. Это позволило, например, создать одночастотный эрбиевый лазер на основе высокодобротного резонатора Фабри–Перо, сформированного двумя волоконными брэгговскими решетками (ВБР), записанными непосредственно в КВС [4].

В настоящей работе фотоиндуцированное изменение показателя преломления (ПП) в фосфоросиликатном КВС при его облучении излучением эксимерного ArF-лазера ($\lambda = 193$ нм) исследовано более подробно. Экспериментальными образцами были как исходные композитные световоды, так и КВС, предварительно подвергнутые низкотемпературной водородной обработке. Приведены и проанализированы результаты, полученные при записи ВБР УФ излучением, а также при их термическом отжиге (стирании), выполнявшемся в режиме линейного нагрева.

2. Образцы для исследований и методики экспериментов

Образцы КВС для исследований были изготовлены в соответствии с методикой, описанной в работе [2]. Химический состав сердцевины КВС и концентрации основных легирующих добавок таковы [4]: 24 мол. % P_2O_5 /3.5 мол. % Al_2O_3 /2.5 мол. % Gd_2O_3 /70 мол. % SiO_2 . Световод имел профиль ПП, близкий к ступенчатому при разности ПП сердцевины и оболочки $\Delta n \approx 0.025$, и был одномодовым в области длин волн 1.5 мкм (длина волны отсечки первой высшей моды $\lambda_c \approx 1.4$ мкм). Диаметр сердцевины КВС составлял 4.5 мкм, а внешней кварцевой оболочки – 125 мкм.

Для измерения спектров исходного и фотоиндуцированного поглощения в УФ и видимом диапазонах спектра были использованы поперечные срезы заготовки

А.А.Рыбалтовский, О.В.Бутов. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, к.7; e-mail: rybalovsky@yandex.ru

С.А.Васильев, С.Г.Журавлев, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

О.Н.Егорова, Б.И.Галаган, С.Е.Сверчков, Б.И.Денкер. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

КВС толщиной 0.2 и 0.5 мм. Часть образцов толщиной 0.2 мм перед облучением выдерживалась в атмосфере молекулярного водорода в течение 7 дней при температуре 90°C и давлении 120 атм. При тех же значениях температуры и давления проводилось насыщение части образцов КВС в течение 24 часов. Измерения спектров поглощения были выполнены с помощью спектрометра PerkinElmer Lambda 900 в диапазоне 190–800 нм.

В качестве источника УФ излучения с длиной волны 193 нм (энергия кванта 6.4 эВ) в нашей работе использовался эксимерный ArF-лазер (Coherent COMPexPro), генерирующий импульсы длительностью ~20 нс с частотой следования 10 Гц. УФ облучение поперечных срезов заготовки КВС осуществлялось через диафрагму диаметром 1 мм при плотности энергии импульса 200 мДж/см². Для записи ВБР применялось боковое УФ облучение отрезков КВС через фазовую маску (период маски 1064 нм) при тех же плотностях энергии. Формирование ВБР в сердцевине КВС происходило за счет интерференции ±1-го порядков дифракции на фазовой маске при нормальном падении пучка УФ излучения [5]. Для исследований записывались однородные (неизменный период вдоль решетки) ВБР длиной 3–10 мм с коэффициентом отражения, как правило, $R \approx 99\%$.

Отжиг ВБР проводился в резистивной печи в режиме линейного нагрева с тремя скоростями dT/dt различающимися попарно в 5 раз: 0.05, 0.25, 1.25 К/с [6, 7]. В процессе записи и отжига ВБР периодически измерялись спектры их пропускания с использованием оптического анализатора спектра Yokogawa AQ6370D при максимальном спектральном разрешении 0.02 нм.

Амплитуда модуляции наведенного показателя преломления (НПП) Δn_{mod} определялась путем пересчета измеренного коэффициента отражения ВБР, а среднее значение Δn_{avr} – по сдвигу резонансной длины волны λ_{res} в соответствии с известными формулами, приведенными, например, в [8].

3. Результаты экспериментов

3.1. Исходное и фотоиндуцированное поглощение

Спектр исходного поглощения стекла сердцевины КВС, измеренный на поперечном срезе заготовки световода, представлен на рис.1,а. Хорошо различимы расположенные в видимой части спектра полосы поглощения ионов Er³⁺ [9], а также УФ полосы поглощения ионов Gd³⁺ с максимумами при 4.3, 5.1, 5.5 и 6 эВ, соответствующие внутриконфигурационным 4f–4f-переходам [10].

Коэффициент поглощения на длине волны облучения 193 нм составляет ~40 см⁻¹. Если предположить, что спектр поглощения при вытяжке КВС изменяется не сильно, то доля поглощенного излучения в сердцевине световода оказывается относительно небольшой (~2%). В пределах точности наших измерений спектр поглощения объемных образцов после водородной обработки не изменился.

Согласно выводам работы [11], в чистом фосфоросиликатном стекле поглощение на $\lambda = 193$ нм в основном обусловлено полосой фосфорных кислородно-дефицитных центров (ФКДЦ), максимум которой находится при 6.9 эВ. Можно предположить, что в рассматриваемом нами случае КВС на длине волны облучения 193 нм к указанному поглощению ФКДЦ добавляется поглощение

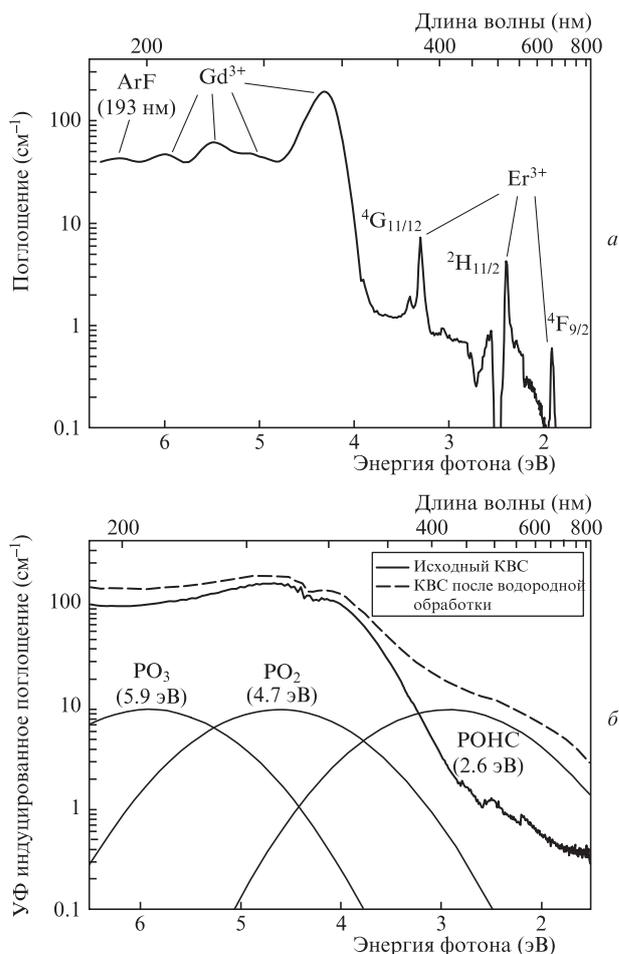


Рис.1. Спектры исходного (а) и фотоиндуцированного (б) поглощения фосфатного стекла сердцевины КВС.

ионов Gd³⁺. Слабоинтенсивные полосы ионов Er³⁺ не оказывают существенного влияния на величину поглощения вблизи 193 нм.

Как следует из параметров использованного волокна, среди легирующих добавок в сердцевине КВС наибольшую концентрацию (24 мол. %) имеет оксид фосфора. Согласно работам [12–15], в сетке фосфатного стекла при воздействии квантов УФ излучения, рентгеновского или гамма-излучения формируются центры окраски, полосы поглощения которых расположены преимущественно в видимой и УФ областях спектра [16, 17]. Проанализируем спектры наведенного поглощения срезов заготовок КВС, облученных одинаковой дозой $D_{UV} = 1.2$ кДж/см² (рис.1,б). Видно, что основной вклад в наведенное поглощение в диапазоне длин волн 200–800 нм вносит полоса с максимумом при 4.7 эВ (260 нм), соответствующая поглощению электронных центров PO₂ [14]. В образцах, предварительно насыщенных H₂, структура этих центров модифицирована атомарным водородом – НРО₂ [15]. Помимо полосы поглощения при 4.7 эВ, форма приведенных на рис.1,б спектров в диапазоне 5.5–6.5 эВ может быть объяснена вкладом достаточно интенсивной и более коротковолновой полосы с максимумом вблизи 6.6 эВ, которая, по всей видимости, связана с поглощением кислородно-дефицитных центров [16]. В видимой части спектра образца, облученного после предварительного насыщения водородом (штриховая кривая), виден вклад слабоинтенсивной полосы с максимумом вблизи 2.5 эВ, ко-

торая может быть связана с поглощением дефектов типа «самозахваченные дырки» [17]. В целом учет вклада полюс при 2.5, 4.7 и 6.6 эВ позволяет с хорошей точностью описать форму спектров наведенного поглощения как в насыщенных водородом образцах КВС, так и в образцах, не подвергавшихся водородной обработке.

Отметим, что наведенное поглощение весьма значительно (в максимуме – 180 см^{-1} без водорода и 220 см^{-1} с водородом, что, как видно из рис.1, в несколько раз превышает начальное поглощение в диапазоне 4.5–6.5 эВ), и поэтому, согласно соотношениям Крамерса–Кронига, может давать заметный вклад в величину НПП на длинах волн $\sim 1.5 \text{ мкм}$ [18, 19]. Отметим также, что вследствие УФ облучения существенно возрастает поглощение и на длине волны излучения эксимерного лазера – 193 нм, что должно приводить к возрастанию доли поглощенной мощности в сердцевине КВС в процессе записи ВБР.

3.2. УФ индуцированное изменение показателя преломления

Дозные зависимости амплитуды модуляции Δn_{mod} и среднего наведенного ПП Δn_{avr} , измеренные как для исходных КВС, так и для световодов, подвергнутых водородной обработке, приведены на рис.2 в двойных логарифмических координатах. В обоих случаях УФ облучение на длине волны 193 нм приводит к положительной добавке к ПП, которая, как и во многих других типах фоточувствительных составов стекол, хорошо описывается степенной функцией дозы $\Delta n \sim D^b$. В данном случае показатель степени $b = 0.58 \pm 0.02$ для исходных КВС и $b = 0.85 \pm 0.02$ для световодов с растворенным в сетке стекла H_2 . Так же как и в германосиликатных световодах, молекулярный водород, находящийся в сердцевине КВС, значительно (не менее чем в 5 раз) увеличивает его фоточувствительность.

Отметим, что дозные зависимости НПП, приведенные на рис.2, значительно отличаются от своих аналогов, измеренных при облучении фосфоросиликатных ВС, изготовленных методом MCVD, которые на начальном участке имеют зависимость, близкую к квадратичной [20, 21].

Фоточувствительность ВС на основе фосфатного стекла при облучении на длине волны 193 нм изучалась в [22, 23]. Результаты этих работ в значительной степени отличаются от полученных нами как при записи ВБР, так и при их термическом отжиге, что, по-видимому, объясняется различиями в составе стекла, а также наличием в нашем случае тугоплавкой кварцевой оболочки с низким коэффициентом температурного расширения (КТР), вносящей существенные особенности в рассматриваемые нами процессы.

Зависимости, полученные при записи ВБР в исходном КВС, показывают (рис.2), что контраст НПП в структуре ВБР (отношение $\Delta n_{\text{mod}}/\Delta n_{\text{avr}}$) при использованном нами способе записи составляет 0.7–0.8. Вместе с тем, при больших дозах облучения ($D_{\text{UV}} > 500 \text{ Дж/см}^2$) в КВС с водородом контраст НПП значительно снижается за счет заметного насыщения амплитуды модуляции. Как правило, в таких случаях предполагается, что снижение контраста структуры ВБР происходит вследствие гомогенной засветки (механическая нестабильность системы записи и т. д.) и/или нелинейности дозной зависимости, приводящей к насыщению НПП в максимуме интенсивности и к появлению более высоких пространственных гармоник. Однако, если провести сравнение с тем, как возрастает

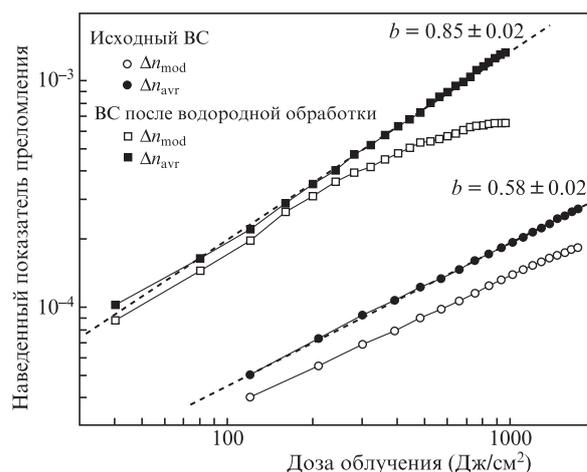


Рис.2. Зависимости амплитуды модуляции (о, □) и среднего значения (●, ■) наведенного ПП от дозы УФ облучения для исходного КВС и для световода, подвергнутого водородной обработке.

тает Δn_{mod} в случае КВС без водорода, видно, что влияние этих двух факторов не находит подтверждения. Контраст структуры ВБР не снижается или снижается не столь значительно при дозах облучения вплоть до 2 кДж/см², а степень линейности дозной зависимости для КВС с водородом даже выше, чем для КВС без водорода.

Объяснение снижения контраста структуры ВБР при записи в КВС с водородом может быть следующим. В силу большого различия КТР сердцевинки и оболочки сердцевина КВС при комнатной температуре находится в поле значительных растягивающих напряжений, которые вследствие упругооптического эффекта несколько уменьшают ПП сердцевинки. УФ облучение стекла с водородом приводит к перестройке сетки стекла, сопровождающейся разрывом регулярных и дефектных связей с последующим насыщением их атомами водорода, в результате которого образуются гидридные и гидроксильные группы [24]. В поле растягивающих напряжений этот процесс может приводить к разрежению сетки стекла в облученных местах сердцевинки и к уплотнению в необлученных. Таким образом, можно предположить формирование дополнительной решетки, что связано с указанным изменением плотности стекла сердцевинки, причем изменение ПП для этой решетки имеет противоположный знак по отношению к основной ВБР. Следствием такого процесса является снижение амплитуды модуляции НПП ВБР. Следует также отметить, что происходящая при этом релаксация растягивающих напряжений в сердцевине КВС должна приводить к дополнительному увеличению в ней среднего НПП.

3.3. Отжиг фотоиндуцированного показателя преломления

Результаты отжига ВБР, записанных в исходном КВС без водородной обработки, приведены на рис.3. На рис.3,а показано относительное изменение амплитуды модуляции НПП ВБР (нормировано на начальное значение), измеренное при $T \approx 300 \text{ К}$, в зависимости от температуры печи. Приведенные данные получены при отжиге трех ВБР с различными скоростями нагрева, постоянными в течение эксперимента. Видно, что во всех случаях с ростом температуры печи вплоть до температур размягчения материала сердцевинки КВС (900–1000 К) [3] происходит

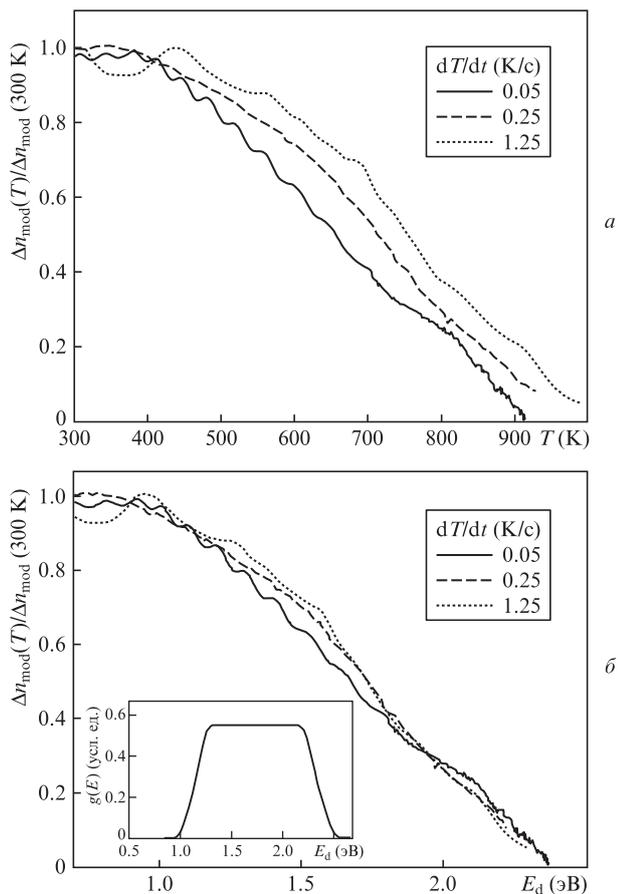


Рис.3. Измеренные при трех скоростях нагрева зависимости отжига нормированной величины Δn_{mod} для ВБР, записанных в КВС без водородной обработки (а), и эти же зависимости, построенные в координатах демаркационной энергии E_d при наилучшем их совмещении (б).

монотонное уменьшение Δn_{mod} , причем чем медленнее идет нагрев, тем раньше (при меньших температурах) отжигается ВБР. Приведенные зависимости позволили построить так называемую базовую кривую [25] температурной стойкости НПП в КВС, которая позволяет рассчитывать изменение свойств ВБР в более общем случае, при тепловой экспозиции произвольного вида, в том числе при долговременной эксплуатации ВБР. Для построения базовой кривой отжига полученные экспериментальные зависимости совмещаются в координатах демаркационной энергии $E_d = kT \ln(v_0 t)$, где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $v_0 = 10^9$ – частотный фактор; t – время [25]. Такое совмещение реализуется путем подбора величины частотного фактора, а точнее, ее показателя n . Отметим, что чаще всего случайные и систематические погрешности измерений не позволяют совместить экспериментальные зависимости с высокой точностью и во всем диапазоне изменения Δn_{mod} , поэтому точность определения частотного фактора, как правило, относительно невелика. В наших экспериментах она была не лучше двух порядков: $v_0 \approx 10^{9 \pm 2}$ Гц.

На рис.3,б приведено совмещение измеренных зависимостей в координатах E_d , полученное при $n = 9$. Видно, что базовая кривая в этом случае по-существу представляет собой почти прямую линию, поэтому ее производная $g(E)$, схематически изображенная на вставке рис.3,б, напоминает трапецию, плоская вершина которой имеет протяженность ~ 1 эВ. Как правило, предполагается, что

отжиг НПП приводит сетку стекла в исходное состояние, т. е. индуцированные УФ модификации сетки термически обратимы. При этом функция $g(E)$ рассматривается как распределение активационных барьеров термоиндуцированных обратных переходов. Таким образом, если предположить, что НПП в исходных КВС при облучении на длине волны 193 нм формируется за счет некоторого одного фотоиндуцированного процесса (механизма), то приведенные на рис.3 зависимости позволяют предположить, что изменения сетки существенно зависят от локального окружения (существенно неоднородны). В сетке SELG, активированного редкоземельными ионами, области с наибольшей неоднородностью локализованы преимущественно вблизи редкоземельных ионов (в настоящей работе – вблизи ионов эрбия и гадолиния), поскольку в первой координационной сфере одного иона могут присутствовать одновременно атомы фосфора, алюминия и кислорода [26]. Учитывая значительный вклад поглощения ионов Gd^{3+} в начальное поглощение на длине волны 193 нм, логично было бы предположить, что основные индуцированные УФ преобразования сетки стекла и появление центров окраски с высокой вероятностью происходят в ближайшем окружении ионов гадолиния.

Аналогичные показанным на рис.3 зависимостям, которые были измерены для ВБР, записанных в КВС после водородной обработки, представлены на рис.4. Видно, что они имеют более сложный вид, а именно: при температуре ~ 600 К падение амплитуды модуляции приостанавливается и вновь продолжается через ~ 100 К. Совмещение зависимостей, измеренных при разных скоростях нагрева (рис.4,а), наилучшим образом реализуется также при частотном факторе $v_0 \approx 10^9$ Гц и, как и в предыдущем случае, из-за относительно небольшой разности скоростей отжига (25 раз) погрешность определения этой величины не лучше двух порядков (рис.4,б).

На вставке рис.4,б приведена производная базовой кривой, полученная для этого случая. «Двугорбая» форма зависимости позволяет предположить наличие двух механизмов фотоиндуцированного изменения ПП, вносящих сопоставимый вклад в НПП и имеющих различную температурную стойкость. Вместе с тем, можно предположить, что механизм формирования НПП в КВС с водородом такой же, как и в КВС без водорода, а плоский участок на кривых отжига, следствием которого является провал в центральной части функции $g(E)$, обусловлен отжигом обсуждавшейся выше решетки плотности с противоположным знаком НПП.

Еще одним контролируемым параметром в наших экспериментах по отжигу ВБР являлось изменение резонансной длины волны λ_{res} , которое в общем случае имеет обратимую и необратимую составляющие [27]. Необратимая часть изменения λ_{res} характеризует отжиг среднего НПП и, как правило, много меньше обратимой части, которая в световодах на основе кварцевого стекла обусловлена термооптическим коэффициентом dn/dT [28].

Температурная чувствительность ВБР (обратимое изменение λ_{res}), записанных как в исходных КВС, так и после их водородной обработки, составила ~ 9.3 пм/К (~ 6.0 ppm/K) в диапазоне 25–100°C, что несколько меньше величины, характерной для ВБР, записанных в германосиликатных световодах и равной ~ 10.3 пм/К (~ 6.6 ppm/K). Такое различие может быть обусловлено меньшим термооптическим коэффициентом стекла сердцевины КВС [3], а также термоиндуцированным измене-

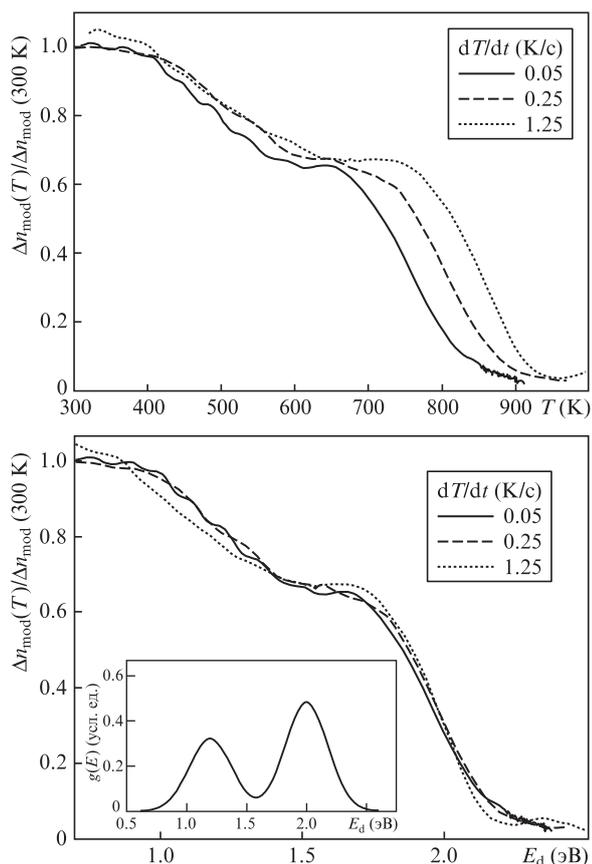


Рис.4. Измеренные при трех скоростях нагрева зависимости отжига нормированной величины Δn_{mod} для ВБР, записанных в КВС после водородной обработки (а), и эти же зависимости, построенные в координатах демаркационной энергии E_d при наилучшем их совмещении (б).

нием механических напряжений в центральной области композитного световода, приводящим к изменению ПП в результате упругооптического эффекта.

4. Заключение

Продемонстрирована высокая фоточувствительность эрбиевого КВС к импульсному лазерному излучению с длиной волны 193 нм. Установлено, что предварительное насыщение световода молекулярным водородом при температуре 90 °С и давлении 120 атм приводит к увеличению фоточувствительности примерно в 5 раз. В облученных образцах заготовок КВС обнаружено значительное (более 100 см⁻¹) увеличение УФ поглощения, связанное, главным образом, с полосой поглощения вблизи 4.7 эВ (260 нм) электронных центров PO₂, а в предварительно насыщенных водородом образцах – модифицированных атомарным водородом центрах НРО₂. Зависимости НПП от дозы облучения с хорошей точностью характеризуются степенной функцией $\Delta n \sim D^b$.

Проведены эксперименты по линейному температурному отжигу фотоиндуцированных ВБР, в результате которых были получены кинетики температурного распада НПП как в насыщенных Н₂, так и в облученных без предварительного насыщения Н₂ образцах КВС. Показано, что для образцов КВС, облученных без насыщения Н₂, характер кинетики температурного распада НПП является монотонно спадающим вплоть до температуры размягче-

ния стекла сердцевины 900–1000 К. Напротив, кинетика распада НПП в образцах КВС, облученных после предварительного насыщения Н₂, стабилизируется в диапазоне температур 600–700 К, что может быть объяснено как влиянием двух механизмов формирования НПП с различной температурной стойкостью, так и отжигом противоположного по знаку НПП, величина которого обусловлена перераспределением плотности материала сердцевины. Работа выполнена в рамках государственного задания.

- Jiang S., Luo T., Hwang B.C., Smekatala F., Seneschal K., Lucas J., Peyghambarian N. *J. Non-Cryst. Solids*, **263**, 364 (2000).
- Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Yu.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. *Opt. Express*, **22**, 7632 (2014).
- Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. *Appl. Phys. B*, **75**, 41 (2002).
- Rybaltofsky A.A., Egorova O.N., Zhuravlev S.G., Galagan B.I., Sverchkov S.E., Denker B.I., Semjonov S.L. *Opt. Lett.*, **44** (14), 3518 (2019).
- Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35** (12), 1085 (2005) [*Quantum Electron.*, **35** (12), 1085 (2005)].
- Rathje J., Kristensen M., Pedersen J.E. *J. Appl. Phys.*, **88** (2), 1050 (2000).
- Божков А.С., Васильев С.А., Медведков О.И., Греков М.В., Королев И.Г. *ИТЭ*, №5, 76 (2005).
- Medvedkov O.I., Vasiliev S.A., Gnusin P.I., Dianov E.M. *Opt. Mater. Express*, **2** (11), 1478 (2012).
- Wang F., Song F., An S., Wan W., Guo H., Liu S., Tian J. *Appl. Opt.*, **54** (5), 1198 (2015).
- Wang Y., He J., Barua P., Chiodini N., Steigenberger S., AbdulKhudus M.I.M., Sahu J.K., Beresna M., Brambilla G. *APL Photon.*, **22**, 046101 (2017).
- Рыбалтовский А.А., Соколов В.О., Плотниченко В.Г., Ланин А.В., Семенов С.Л., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **37** (4), 388 (2007) [*Quantum Electron.*, **37** (4), 388 (2007)].
- Ehrt D., Ebeling P., Natura U. *J. Non-Cryst. Solids*, **263**, 240 (2000).
- Ebeling P., Ehrt D., Friedrich M. *Opt. Mater.*, **20** (2), 101 (2002).
- Griscom D.L., Friebele E.J., Long K.J., Fleming, J.W. *J. Appl. Phys.*, **54** (7), 3743 (1983).
- Hosono H., Kajihara K., Hirano M., Oto M. *J. Appl. Phys.*, **91** (7), 4121 (2002).
- Girard S., Kuhnhen J., Gusarov A., Brichard B., Van Uffellen M., Ouerdane Y., Boukenter A., Marcandella C. *IEEE Transact. Nucl. Sci.*, **60** (3), 2015 (2013).
- Sasajima Y., Tanimura K. *Phys. Rev. B*, **68**, 014204 (2003).
- Kitamura R., Pilon L., Jonasz M. *Appl. Opt.*, **46** (33), 8118 (2007).
- Leconte B., Xie W.X., Douay M., Bernage P., Niay P., Bayon J.F., Poignant H. *Appl. Opt.*, **36** (24), 5923 (1997).
- Strasser T.A. *In Optical Fiber Communication Conf. (OFC-96)* (San Jose, USA, TuO1).
- Ларионов Ю.В., Рыбалтовский А.А., Семенов С.Л., Курзанов М.А., Обидин А.З., Вартапетов С.К. *Квантовая электроника*, **33** (10), 919 (2003) [*Quantum Electron.*, **33** (10), 919 (2003)].
- Xiong L., Hofmann P., Schülzgen A., Peyghambarian N., Albert J. *Opt. Mater. Express*, **4** (7), 1427 (2014).
- Albert J., Schülzgen A., Temyanko V.L., Honkanen S., Peyghambarian N. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (10), 101127 (2006).
- Lancry M., Poumellec B., Niay P., Douay M., Cordier P., Depecker C. *J. Non-Cryst. Solids*, **351** (52–54), 3773 (2005).
- Erdogan T. *J. Lightwave Technol.*, **15** (8), 1277 (1997).
- Funabiki F., Kamiya T., Hosono H. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **120** (11), 447 (2012).
- Гнусин П.И., Васильев С.А., Медведков О.И., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **40** (10), 879 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (10), 879 (2010)].
- Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Friebele E.J. *J. Lightwave Technol.*, **15** (8), 1442 (1997).