

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НАВЕДЕННОГО ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2005 г. А. С. Божков, С. А. Васильев, О. И. Медведков, М. В. Греков, И. Г. Королев

Научный центр волоконной оптики при ИОФ им. А.М. Прохорова РАН

Россия, 119991, Москва, В-333, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 25.10.2004 г.

Описана автоматизированная экспериментальная установка для исследования механизмов изменения наведенного преломления в волоконных световодах при высоких температурах. Для установки разработана резистивная печь, обеспечивающая нагрев участка волоконного световода от комнатной температуры до 1200°C с заданной скоростью изменения температуры. Приведены результаты экспериментов по отжигу решеток, сформированных в германосиликатном световоде с содержанием GeO₂ 14 мол.% в сердцевине. На основе полученных данных проведен расчет температурной стойкости фотоиндуцированных волоконных решеток показателя преломления при различных значениях демаркационной энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Волоконные решетки показателя преломления (п.п.) широко используются в настоящее время в системах волоконно-оптической связи, волоконных лазерах, системах измерения физических величин и т.д. [1, 2].

В основе процесса формирования волоконных решеток п.п. лежит явление фоточувствительности легированного кварцевого стекла – изменение п.п. стекла под действием у.ф.-излучения. При комнатной температуре наведенное преломление остается стабильным в течение длительного времени. Величина п.п., индуцированного в сердцевине волоконного световода, зависит как от параметров световода, так и от условий его облучения. Физические механизмы этого явления активно изучаются, но в настоящее время все еще не вполне ясны.

Фотоиндуцированные волоконные решетки представляют собой участок световода, в сердцевине которого у.ф.-излучением наведено периодическое изменение п.п. Волоконные брэгговские решетки связывают основную моду световода с модой, распространяющейся в противоположном направлении, что приводит к отражению излучения на узком участке спектра. Длиннопериодные волоконные решетки обеспечивают связь основной моды сердцевины с модами оболочки, распространяющимися в том же направлении, что обуславливает появление на резонансной длине волны провала в спектре пропускания.

Известно, что под действием высоких температур (~500°C) фотоиндуцированные решетки распадаются, причем фоточувствительность в отож-

женных местах световода восстанавливается до исходного значения [3]. Изучение температурной стойкости наведенного преломления позволяет получить информацию о том, какие изменения происходят в стекле при его у.ф.-облучении, как они зависят от свойств световода и параметров облучения. Это дает возможность рассчитать спектральные характеристики решеток и динамику их изменения при долговременной эксплуатации фотоиндуцированных структур в различных условиях. Последнее обстоятельство является весьма важным для практического использования решеток, особенно в приложениях, связанных с их периодическим или постоянным нагревом, в частности, в системах измерения повышенных температур.

В ряде работ было показано, что температурная стойкость решеток зависит от таких факторов, как тип световода [4], способ его обработки [5], тип решетки [6, 7], доза облучения [8] и др. Кроме того, оказалось, что температурное воздействие может приводить к формированию решеток нового типа [9, 10].

Для описания необратимого изменения наведенного преломления под действием высоких температур наиболее широко используется модель, предложенная в работе [11], в основе которой лежат следующие представления. Под фотоиндуцированными изменениями подразумевают трансформацию отдельных дефектных центров или переключение связей в регулярной сетке стекла, в результате чего образуются термодинамически неравновесные конфигурации, которым для возвращения в исходное равновесное состояние требуется преодолеть определенный энерге-

тический барьер E . Распределение энергии активации отжига фотоиндуцированных состояний характеризуется функцией $g(E)$. В силу различного локального окружения в сетке стекла высота энергетического барьера варьируется в довольно широких пределах (ширина функции $g(E) \sim 1$ эВ). Естественно, что чем больше величина барьера, тем больше температурная стойкость состояния и связанное с ним изменение п.п. стекла.

Степень распада фотоиндуцированных состояний зависит от температуры T и времени t , в течение которого стекло находилось при этой температуре. Для учета всей тепловой предыстории исследуемого образца удобно ввести понятие граничной или демаркационной энергии E_d (demarcation energy) [11]:

$$E_d = kT \ln(\nu t), \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; ν – частотный фактор, по порядку величины равный частоте колебаний в сетке стекла 10^{13} Гц. Демаркационная энергия в данном случае представляет собой некоторый граничный уровень энергии, разделяющий отожденные и неотожденные состояния. Резкость границы между этими состояниями составляет $\sim kT$ (в рассматриваемом нами диапазоне температур менее 0.1 эВ), что мало в сравнении с шириной распределения $g(E)$.

Для полного описания процесса изменения наведенного преломления при произвольном отжиге световода необходимо знать $g(E)$ и ν . Если известно текущее значение E_d , распределение $g(E)$ может быть получено путем дифференцирования по E_d так называемой “базовой” кривой (master curve) [11]. “Базовая” кривая представляет собой функцию изменения наведенного преломления, построенную в зависимости от демаркационной энергии, и может быть найдена с привлечением результатов, полученных при различных режимах отжига.

Экспериментальные методы исследования температурной стойкости решеток основаны на регистрации изменения спектральных свойств решеток после определенного теплового воздействия на них. В качестве теплового воздействия, как правило, используются изотермический и изохронный отжики [12], а также линейный нагрев с различными скоростями [13].

При исследовании с использованием изотермического отжига несколько решеток отжигаются при различных заданных температурах. Полученные в процессе отжига зависимости изменения наведенного преломления от времени совмещаются в пространстве E_d для получения “базовой” кривой. Недостатками такого метода являются необходимость длительного (многодневного) отжига и недостаточно высокая точность совмещения экспери-

ментальных кривых, измеренных при различных температурах [11, 12].

При использовании изохронного отжига, как правило, одна решетка выдерживается в течение фиксированного времени (10–30 мин) при прогрессивно повышающейся (на 50–100°C за цикл измерений) температуре. Такой метод удобен для качественного сопоставления температурной стойкости решеток, однако, из-за малого количества экспериментальных точек и, следовательно, невысокой точности измерений кривой отжига, а также из-за влияния переходных процессов при изменении температуры печи не может быть использован для детального анализа механизмов отжига.

Наиболее эффективным нам представляется метод исследования, при котором отжиг решетки или серии решеток в печи проводится при температуре, изменяющейся во времени по определенному, в частном случае линейному, закону [13]. Такой подход позволяет за относительно небольшое время с высокой точностью определить необходимые параметры, выполнив отжиг 2-3 идентичных решеток. Вместе с тем следует отметить, что для реализации такого метода необходимо более сложное экспериментальное оборудование, требующее автоматизированного контроля процессов отжига, сбора и обработки экспериментальной информации.

В данной работе подробно описана автоматизированная экспериментальная установка, разработанная для исследования температурно-индуцированных процессов с использованием методов линейного отжига. С ее помощью уже получен ряд важных экспериментальных результатов, которые были опубликованы в работе [8].

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗИСТИВНОЙ ПЕЧИ

Для исследований отжига волоконных решеток была сконструирована печь с рабочим диапазоном температур от комнатной до 1200°C. Нагревательный элемент печи выполнен из фехрелевой проволоки сечением 1.5 мм². Печь (рис. 1) представляет собой металлический (алюминиевый) корпус 1 длиной 30 см, в который помещена труба из кварцевого стекла 2 с двухпроходной намоткой спирали нагревателя 3 (сопротивление нагревателя 30 Ом). Внутри спирали расположена керамическая трубка 4, в которую помещены исследуемый участок световода и измерительный спай термопары типа ХА (хромель–алюминий). Фиксация световода осуществляется зажимами, расположенными вне печи. Свободное пространство между нагревательным элементом и стенками корпуса заполнено теплоизолирующим материалом “термоизол” 5.

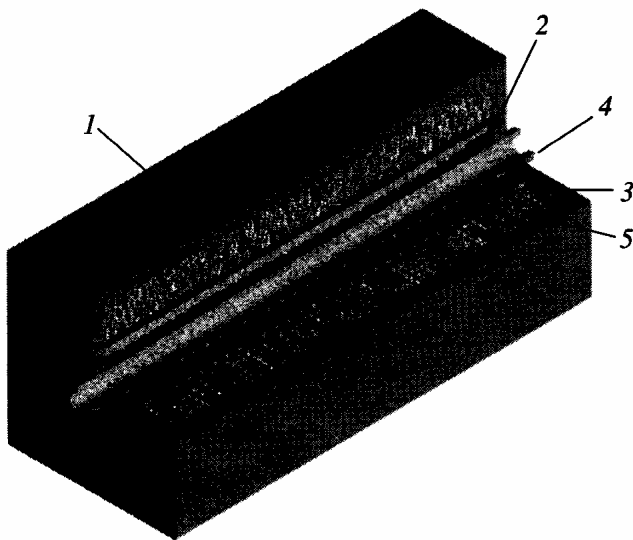


Рис. 1. Конструкция печи. 1 – корпус, 2 – труба из кварцевого стекла, 3 – спираль нагревателя, 4 – керамическая трубка, 5 – теплоизолирующий материал.

На рис. 2а приведены пространственные распределения температуры вдоль оси печи, измеренные в статическом режиме для нескольких значений подводимой мощности (мощность выражена в процентах от ее максимального значения 1600 Вт). На рис. 2б представлены пространственные распределения относительных изменений температуры $\Delta T/T$, рассчитанные по данным рис. 2а. Как видно, во всех случаях размер области, в которой вариации температуры не превышают 5%, составляет порядка 10 см. Такая высокая пространственная однородность температуры печи позволяет проводить отжиг решеток большой длины, а также серий пространственно разнесенных коротких решеток. Отметим, что

типичный размер брэгговских решеток 1–10 мм, а длиннопериодных решеток – 1–10 см. Заметная асимметрия приведенных на рис. 2б распределений, на наш взгляд, связана с некоторой неоднородностью намотки спирали нагревателя, что приводит к различному тепловыделению по длине печи.

Отметим, что относительно большая длина рабочей области печи позволяет использовать разработанную установку для исследования температурных зависимостей и процессов деградации различных свойств волоконных световодов, таких как поглощение, наведенное у.ф.- и γ -излучением, процессы диффузии и ряд других.

Рис. 3 иллюстрирует инерционные свойства печи. На нем представлены временные зависимости температуры на оси в максимуме температурного распределения при включении нагревателя на постоянную электрическую мощность и при его выключении. Сплошная кривая соответствует подводимой мощности 10%, а пунктирная – 5%. Нагреватель включался в начальный момент времени ($t = 0$) и выключался при $t \approx 155$ мин.

Кривые, приведенные на рис. 3, хорошо аппроксимируются суммой двух экспоненциальных функций как при нагреве, так и при остывании. Постоянные времени этих функций, полученные для процесса нагрева печи ($t_{1 \text{ нагр}} \approx 7-9$ мин и $t_{2 \text{ нагр}} \approx 40-50$ мин), слабо зависят от подводимой электрической мощности. Постоянные времени для процесса остывания практически не зависят от температуры, до которой была нагрета печь, и с хорошей точностью равны: $t_{1 \text{ ост}} \approx 10$ мин и $t_{2 \text{ ост}} \approx 70$ мин. На вставке к рис. 3 более подробно показан ход температуры в начальный интервал времени. Как видно, температура на оси печи начинает возрастать примерно через 0.5 мин после включения нагревателя. Такое относительно небольшое

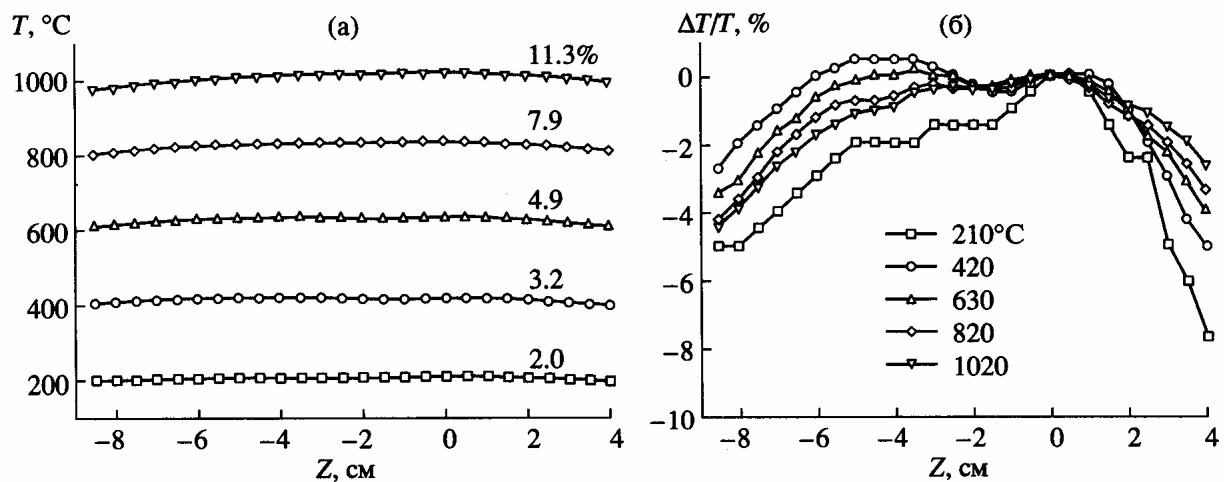


Рис. 2. Стационарные пространственные распределения температуры на оси внутренней трубки, измеренные при разных мощностях нагревателя: а – абсолютные значения температуры (цифры у кривых – мощность нагревателя, выраженная в процентах от максимального значения 1600 Вт); б – вариации температуры, отнесенные к температуре в геометрическом центре печи ($Z = 0$).

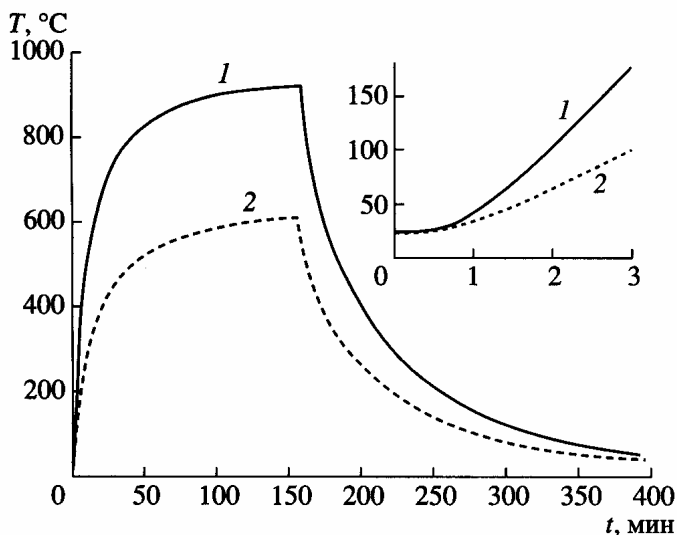


Рис. 3. Зависимость температуры в печи при нагреве (включение нагревателя при $t = 0$) и при остывании (нагреватель выключен при $t = 155$ мин) для разных значений подводимой мощности: 10% (1) и 5% (2). На вставке – изменение температуры в начальный интервал времени.

время отклика обусловлено близким расположением нагревательного элемента к области измерений (~1 см), что позволяет быстро изменять температуру исследуемого образца.

Из графика на вставке к рис. 3 видно, что при подводимой мощности 10% максимально достижимая скорость нагрева печи составляет ~1°C/с. Это значение скорости фактически было предельным для нашей установки при ее использовании в режиме линейного нагрева образцов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОТЖИГА РЕШЕТОК

На рис. 4 приведена схема автоматизированной установки для отжига решеток. В состав уста-

новки входит описанная выше печь 1. Управление электрической мощностью, подводимой к нагревателю печи, осуществляется микропроцессорным регулятором “Минитерм-300.31” (2), управляющим блоком тиристорных ключей. Работа регулятора контролируется персональным компьютером 3 через двунаправленный интерфейс стандарта RS-232 с использованием собственного протокола команд регулятора. Текущая температура измеряется термопарой 4, измерительный спай которой расположен рядом с исследуемой решеткой 5, а опорный спай – вне печи при комнатной температуре, значение которой измеряется регулятором “Минитерм-300.31” с помощью термосопротивления. Усиленный сигнал термопары оцифровывается и передается в компьютер. В большинстве экспериментов измерение температуры, вычисление необходимой мощности и при необходимости ее изменение проводились один раз в секунду.

Спектры пропускания или отражения волоконной решетки измерялись с помощью оптического спектроанализатора 6, при этом в качестве широкополосного источника излучения использовалась вольфрамовая галогеновая лампа или люминесцентный источник 7. Спектр пропускания волоконных решеток считывался в компьютер через заданные интервалы времени. Одновременно фиксировалась текущая температура и время регистрации спектра. Минимальный интервал между считыванием последовательных спектров зависит от используемого спектроанализатора и спектральных параметров решеток и в наших экспериментах составил от 10 до 100 с. Общее время процесса отжига обычно не превышало 8–10 ч, что определяло минимальную используемую нами скорость нагрева печи 0.05°C/с. Все необходимые данные о состоянии печи сохранялись в специально создаваемом файле отчета, который использовался при обработке полученных данных.

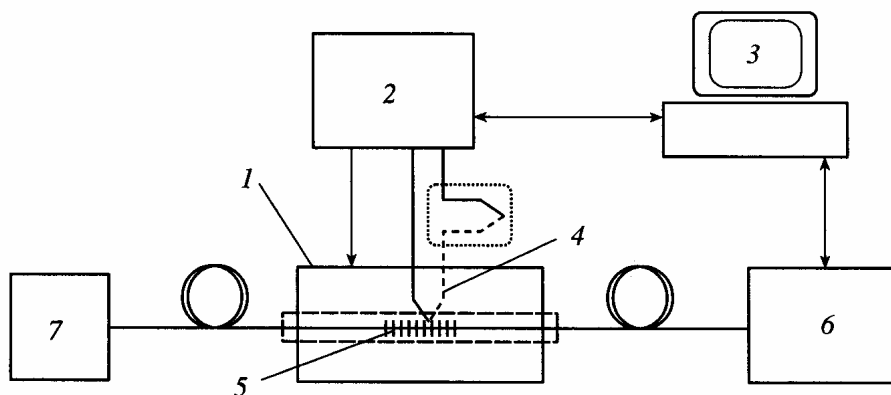


Рис. 4. Схема экспериментальной установки. 1 – печь; 2 – микропроцессорный регулятор “Минитерм-300.31” с блоком тиристорных ключей; 3 – персональный компьютер; 4 – термопара; 5 – исследуемая решетка; 6 – оптический спектроанализатор; 7 – широкополосный источник оптического излучения.

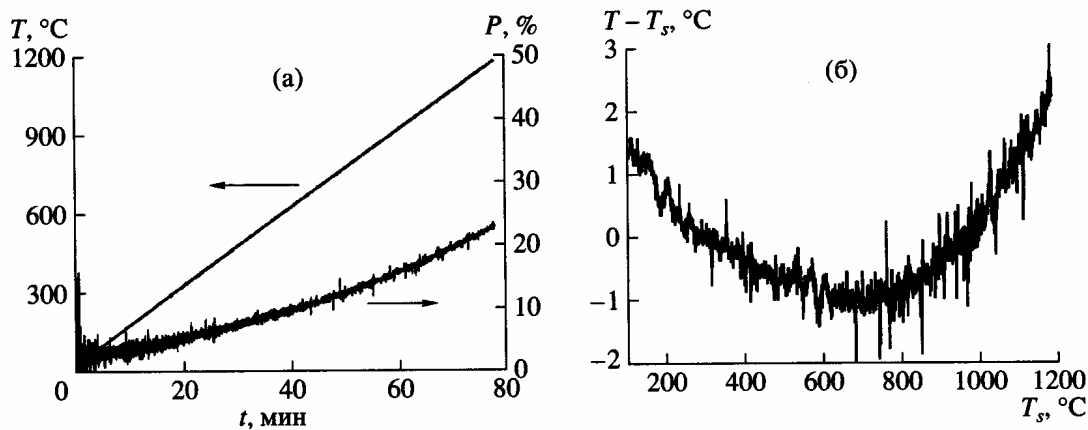


Рис. 5. Временные зависимости температуры и мощности (а), а также отклонение температуры от заданного значения (б) при линейном нагреве печи со скоростью $0.25^\circ\text{C}/\text{c}$.

Электрическая мощность, которую необходимо подводить к нагревателю печи, зависит от режима нагрева, изменение ее текущего значения δY вычисляется с использованием программы управления по закону пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования:

$$\delta Y = K_p \left[\delta T + \tau_d \frac{\Delta(\delta T)}{\Delta t} + \frac{1}{\tau_i} \sum_{i=1}^n \delta T \right] 100\%, \quad (2)$$

где δT – отклонение от заданной температуры; $\frac{\Delta(\delta T)}{\Delta t}$ – скорость изменения отклонения; $\sum_{i=1}^n \delta T$ – накопленная сумма отклонений; K_p – коэффициент пропорциональности; τ_d , τ_i – постоянные дифференцирования и интегрирования соответственно. Значения коэффициентов были рассчитаны,

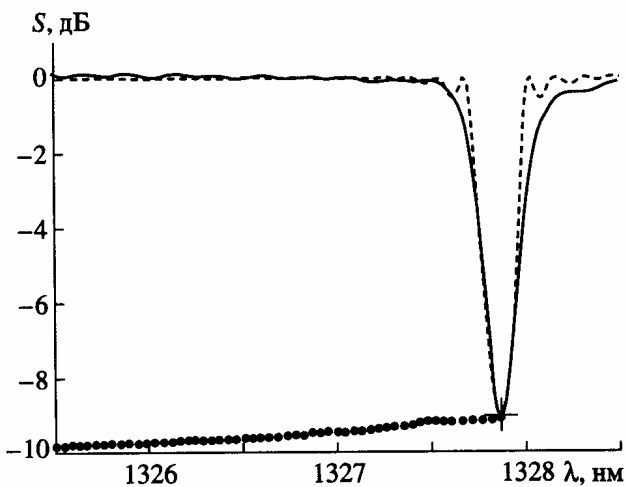


Рис. 6. Иллюстрация процедуры обработки экспериментальных спектров.

исходя из реальных инерционных свойств печи (см. рис. 3), и составили: $K_p = 23.5$, $\tau_d = 4$ с, $\tau_i = 100$ с.

Следует отметить, что в пределах инерционности печи можно задавать произвольную функцию изменения температуры от времени. Для отжига решеток мы использовали линейный нагрев со скоростями $0.05^\circ\text{C}/\text{c}$ и $0.25^\circ\text{C}/\text{c}$.

На рис. 5а приведены график линейного роста температуры от комнатной до 1200°C со скоростью $0.25^\circ\text{C}/\text{c}$ и соответствующее изменение подводимой к печи электрической мощности, а на рис. 5б – абсолютное отклонение температуры от линейного закона. Видно, что отклонение температуры составляет $< 2^\circ\text{C}$ (менее 0.2%) во всем диапазоне температур.

Обработка записанных в процессе эксперимента спектров пропускания волоконных решеток осуществлялась с помощью разработанного программного обеспечения, которое позволяет в удобной для пользователя форме преобразовывать набор экспериментальных спектров во временные зависимости изменения коэффициента отражения и резонансной длины волны решетки. Поскольку решетки предполагаются однородными, коэффициент отражения однозначно связан с амплитудой модуляции наведенного преломления, в то время как длина волны – с эффективным н.п. основной моды в области решетки [1, 2].

Рис. 6 иллюстрирует процедуру обработки экспериментальных спектров. Очередной спектр волоконной брегговской или длиннопериодной решетки (сплошная кривая) выводится в окне программы вместе с расчетным спектром решетки (пунктирная кривая). Глубина и резонансная длина волны последнего определяется положением курсора мыши (крестик на рис. 6). Нажатием кнопки мыши при наилучшем совмещении указанных спектров осуществляется запись очередной точки на кривой распада (сплошные кружки). В результате такой обработки удается получить

кривые отжига, состоящие из нескольких сотен экспериментальных точек. Точность определения амплитуды модуляции наведенного преломления и эффективного п.п. основной моды $\sim 2 \cdot 10^{-6}$.

ПРИМЕРЫ ОТЖИГА ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК

Для иллюстрации работы установки приведем некоторые результаты, полученные нами при измерении характеристик термоиндуцированного распада брэгговских и длиннопериодных решеток, сформированных в германосиликатном волоконном световоде с концентрацией диоксида германия в сердцевине 14 мол. % [8]. Световод изготовлен по технологии MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) в Институте химии высокочистых веществ РАН (Нижний Новгород) и Научном центре волоконной оптики при ИОФ им. А.М. Прохорова РАН (Москва) и не имел других легирующих примесей в областях сердцевины и оболочки. Волоконные брэгговские решетки изготавливались с использованием интерферометра Ллойда [14] с помощью непрерывного излучения второй гармоники аргонового лазера с длиной волны 244 нм при интенсивности излучения ~ 50 Вт/см². Измеренные значения амплитуды модуляции и среднего наведенного преломления были близки друг к другу, что свидетельствовало о высоком контрасте интерференционной картины при записи решетки. Длиннопериодные решетки формировались пошаговым способом [15] с помощью того же лазерного излучения при интенсивности ~ 10 кВт/см² и имели длину менее 10 см. Для отжига при разных скоростях линейного нагрева изготавливалось несколько идентичных решеток.

На рис. 7 приведены температурные зависимости амплитуды модуляции наведенного преломления, полученные при скоростях линейного нагрева $0.05^\circ\text{C}/\text{c}$ и $0.25^\circ\text{C}/\text{c}$ для брэгговской решетки, сформированной при дозе 76 кДж/см² ($\Delta n_0 = 3 \cdot 10^{-4}$). Эти зависимости были использованы для построения "базовой" кривой в пространстве демаркационной энергии E_d . Для этого значение частотного фактора ν в уравнении (1) подбиралось таким образом, чтобы совместить указанные зависимости при их построении как функции E_d . Как отмечалось в [13], для улучшения точности совмещения экспериментальных кривых используемые скорости отжига должны отличаться друг от друга как можно больше. Вместе с тем значительное снижение скорости нежелательно из-за возрастающей при этом длительности эксперимента. Примененное нами для обработки экспериментальных данных программное обеспечение позволило получить кривые отжига с малыми погрешностями и надежно определить частотный фактор всего лишь при пятикратном различии скоростей нагрева.

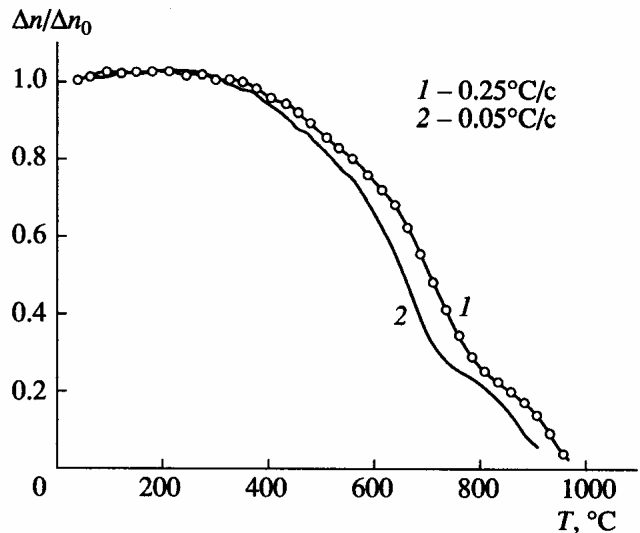


Рис. 7. Относительное изменение амплитуды модуляции наведенного преломления при линейном отжиге брэгговской решетки со скоростями 0.25 (1) и $0.05^\circ\text{C}/\text{c}$ (2).

Хорошее совмещение кривых, приведенных на рис. 7, достигается при значениях $\nu = 10^\alpha$ Гц, где $\alpha = 13 \pm 0.5$. "Базовая" кривая отжига при $\nu = 10^{13}$ Гц приведена на рис. 8а. Отметим, что полученное нами значение ν хорошо согласуется с приведенным в [3].

Как отмечалось, функция распределения энергии активации отжига фотоиндуцированных состояний $g(E)$ может быть получена дифференцированием "базовой" кривой. Как правило, эта кривая известна с большими погрешностями, поэтому для дифференцирования ее приходится аппроксимировать определенными аналитическими зависимостями [11, 12]. Такая процедура может приводить к потере особенностей "базовой" кривой.

При использовании разработанной нами установки удается получать "базовую" кривую, состоящую из достаточно большого числа экспериментальных точек, имеющих относительно низкую погрешность, что позволяет проводить прямое численное дифференцирование этой кривой. Полученное в результате распределение $g(E)$ представлено на рис. 8б. Оно хорошо аппроксимируется суммой двух гауссовых полос с центрами при 2.3 ± 0.1 эВ и 2.9 ± 0.1 эВ, имеющих полную ширину на полувысоте 0.9 ± 0.2 эВ и 0.5 ± 0.15 эВ соответственно. Эти параметры полос в пределах указанных погрешностей наблюдались для брэгговских решеток, сформированных в широком диапазоне доз у.ф.-излучения. Обратим внимание на то, что приведенное на рис. 8б распределение ограничено энергией $E < 3.25$ эВ. Это связано с тем, что надежность результатов, полученных для $E > 3.25$ эВ, была достаточно низкой, что, по нашему мнению, обусловлено неучетом релакса-

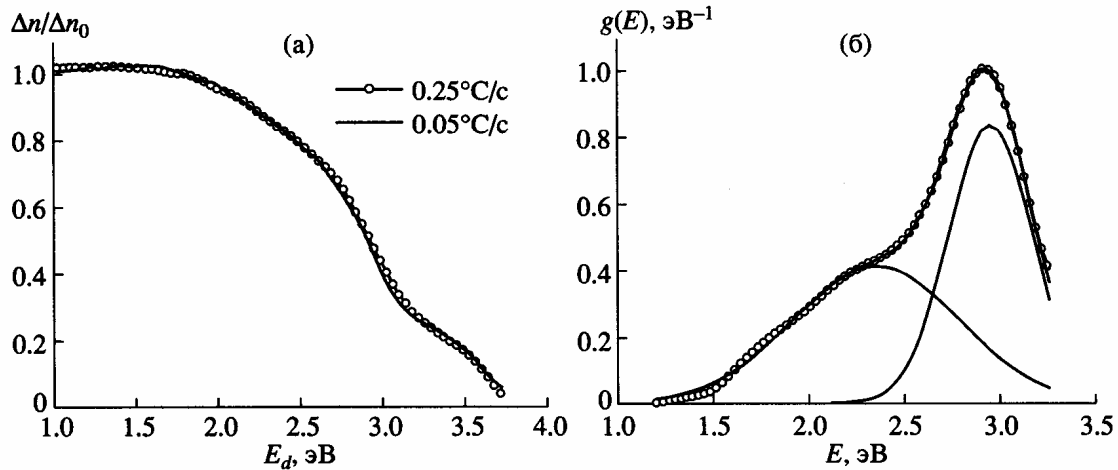


Рис. 8. а – “базовая” кривая исследованных решеток, полученная при $\nu = 10^{13}$ Гц; б – распределение энергии активации отжига фотоиндуцированных состояний в сетке стекла $g(E)$ при дозе у.ф.-излучения 76 кДж/см^2 .

ции упругих напряжений (как исходных, так и фотоиндуцированных) в структуре световода.

На рис. 9 приведены температурные зависимости наведенного преломления, полученные при отжиге брэгговской и длиннопериодной (период – 150 мкм, длина – 12 мм) решеток при $dT/dt = 0.25^\circ\text{C/c}$. Для длиннопериодной решетки исследовался резонанс, соответствующий связи с оболочечной модой HE_{19} . Как видно, зависимости для обеих решеток совпадают. Это свидетельствует о том, что изменение индуцированного у.ф.-излучением п.п. при отжиге решеток, а значит, и процессы, происходящие при формировании решеток в германосиликатном световоде, не зависят от периода решетки и интенсивности формирующего из-

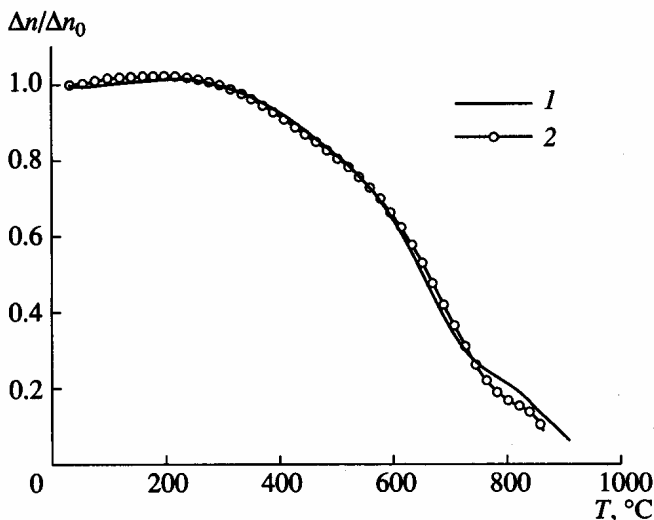


Рис. 9. Температурные зависимости наведенного преломления, полученные при отжиге брэгговских (1) и длиннопериодных (2) волоконных решеток.

лучения. По-видимому, этот вывод справедлив лишь для световодов с относительно низкой концентрацией германия в сердцевине (<20 мол.%), в которых формируются решетки типа I [2], исследовавшиеся в наших экспериментах.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТОЙКОСТИ РЕШЕТОК

Отметим в заключение, что полученные результаты могут быть эффективно использованы для прогнозирования деградации характеристик фотоиндуцированных решеток при их использовании в течение длительного времени при различных, в том числе повышенных, температурах.

В качестве примера на рис. 10 приведены расчетные зависимости распада брэгговских решеток, сформированных в исследованном нами световоде при дозах у.ф.-излучения 1.1 и 76 кДж/см^2 , а также аналогичная зависимость для решетки, предварительно отожженной в течение 1 ч при 575°C . Коэффициент отражения всех решеток перед тепловой обработкой (10000 ч при 400°C) составлял 99%. Как видно, в решетках, которые не подвергались дополнительной тепловой обработке, коэффициент отражения уменьшился до 83% и 71%. Полученные нами результаты позволили рассчитать предварительный отжиг решеток, необходимый для того, чтобы уменьшение коэффициента отражения при указанной тепловой обработке не превысило 1%. Из расчета следует, что такой отжиг должен быть эквивалентен отжигу в течение 1 ч при 575°C , а демаркационная энергия при этом должна достичь 2.79 эВ.

Очевидно, что решетка перед проведением предварительного отжига должна иметь определенный запас наведенного преломления, который изменяется при этом отжиге. Отметим также, что в приведенном нами случае распад отож-

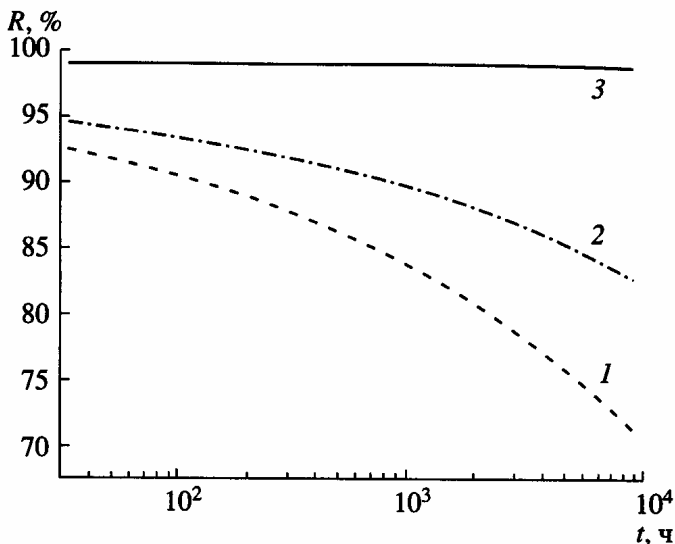


Рис. 10. Изменение коэффициента отражения R брэгговских решеток, сформированных в световоде при дозах у.ф.-излучения 1.1 кДж/см^2 (1) и 76 кДж/см^2 (2), а также отожженной в течение 1 ч при 575°C (3), в процессе тепловой обработки в течение 10000 ч при температуре 400°C .

женных решеток оказался невелик независимо от того, какая доза облучения использовалась при их изготовлении. Это объясняется тем, что дополнительное изменение демаркационной энергии составило всего лишь 0.02 эВ , что относительно мало по сравнению с оставшейся частью распределения энергии активации $g(E)$.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 04-02-17025),

а также Московским комитетом по науке и технологиям (грант 1.2.30, 2004 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kashyap R.* Fiber Bragg Gratings. San Diego: Academic Press, 1999.
2. *Othonos A., Kalli K.* Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. London: Artech House, 1999.
3. *Atkins R.M., Mizrahi V.* // Electronics Letters. 1992. V. 28. P. 1743.
4. *Baker S.R., Rourke H.N., Baker V., Goodchild D.* // J. Lightwave Technol. 1997. V. 15(8). P. 1470.
5. *Patrick H., Gilbert S.L., Lidgard A., Gallagher M.D.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. № 5. P. 2940.
6. *Dong L., Liu W.F.* // Applied Optics. 1997. V. 36. № 31. P. 8222.
7. *Archambault J.-L., Reekie L., Russel P.St.J.* // Electron. Lett. 1993. V. 29. № 5. P. 453.
8. *Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Bozhkov A.S., Dianov E.M.* // BGPP'2003. Monterey, California, USA. OSA Technical Digest, 2003. Paper MD31. P. 145.
9. *Fokine M.* // Optics Letters. 2002. V. 27. № 12. P. 1016.
10. *Fokine M.* // J. Opt. Soc. Am. B. 2002. V. 19. № 8. P. 1759.
11. *Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P.J., Monroe D.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 76(1). P. 73.
12. *Razafimahatratra D., Niay P., Douay M. et al.* // Applied Optics. 2000. V. 39. № 12. P. 1924.
13. *Rathje J., Kristensen M., Pedersen J.E.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. P. 1050.
14. *Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А.* Препринт № 6 НЦВО ИОФ РАН. М., 2004.
15. *Королев И.Г.* Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: НЦВО при ИОФ РАН, 2004.