

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.6>

УДК: 681.7.068

РЕГЕНЕРАЦИЯ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК, ЗАПИСАННЫХ ПОТОЧЕЧНЫМ МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Д.В. Пржиялковский¹, Н.А. Плюскова^{1,2}, О.В. Бутов¹

**¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7**

**²Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.**

Статья поступила в редакцию 15 августа 2024 г.

Аннотация. Актуальность исследований термической стойкости волоконных брэгговских решеток обусловлена перспективой их применения в сложных условиях эксплуатации при повышенных температурах. Одним из самых высокотемпературных типов таких структур, созданных в кварцевых волоконных световодах, являются регенерированные брэгговские решетки. Как правило, эффект регенерации наблюдается в решетках, записанных в волокнах, насыщенных молекулярным водородом и/или высоколегированных гермоаносиликатных световодах. В настоящей работе впервые обнаружена регенерация решеток, записанных методом поточечной записи излучением фемтосекундного лазера в стандартном телекоммуникационном волокне Corning SMF-28 без присутствия водорода в технологических процессах. В работе описывается возможный механизм формирования таких регенерируемых структур.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, фемтосекундная запись, регенерация, изотермический отжиг.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Пржиялковский Дмитрий Владимирович
DVPRZ@yandex.ru

Введение

Последние несколько десятилетий волоконно-оптические технологии получили самое бурное развитие, и в настоящее время лежат в основе работы современной телекоммуникации, оптических сенсорных систем, лазерного промышленного оборудования, системы безопасности и многих других.

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) является одним из ключевых элементов и неотъемлемой частью большинства волоконно-оптических устройств и систем, ВБР находят свое применение в качестве узкополосных фильтров и элементов резонаторов волоконных лазеров, в качестве стабилизирующих элементов источников излучения в телекоммуникации [1-7]. Благодаря способности изменять свои параметры под воздействием внешних факторов, таких как температура и деформация, ВБР могут выступать чувствительными элементами в сенсорных системах и датчиках, в системах контроля и безопасности [2,4,7].

Базовой технологией создания ВБР является их запись с помощью ультрафиолетового излучения в фоточувствительном германосиликатном волоконном световоде. Часто для повышения эффективности записи используют методику насыщения волоконного световода молекулярным водородом под высоким давлением [3, 8,9]. На практике, из-за относительно низкой устойчивости ВБР, полученных таким способом, к воздействию высоких температур применение приборов на их основе ограничено [10-12]. При этом само кварцевое стекло и волокна на его основе имеют достаточно высокую термическую устойчивость. Поэтому вопросы создания ВБР с высокой

термической стойкостью остаются актуальными с момента создания первых брэгговских сенсоров и по сей день [13-18].

В литературе встречается множество работ, посвященных технологии создания высокотемпературных брэгговских решеток. И наиболее перспективными, с точки зрения устойчивости к температуре, были признаны два типа ВБР. К первому типу относятся решетки Туре II [19-21]. Как правило, запись таких решеток осуществляется методами направленной записи при помощи фемтосекундного излучения [22-24]. Другим, более экзотичным и наиболее термоустойчивым типом ВБР являются так называемые регенерированные решетки. Такие решетки способны выдерживать длительное воздействие температуры вплоть до 1400 °С [25-27].

Регенерированные решетки выделяют в отдельный тип из-за их специфического метода получения и специфических свойств. Процесс регенерации имеет несколько принципиальных этапов. На первом этапе происходит запись затравочной решетки. Далее затравочную решетку отжигают при определенной температуре, в результате чего затравочная решетка распадается, и ее отражательная способность падает до нуля, а на ее месте возникает новая (регенерированная) решетка. После окончания процесса регенерации такая решетка остается стабильной длительное время даже при температурах более 1000 °С.

Само понятие регенерации ВБР известно уже достаточно давно. Несмотря на многолетние исследования и различные, предложенные в научной литературе, механизмы, до сих пор нет единой сформированной модели этого эффекта, которая бы объясняла все наблюдаемые закономерности.

Изначально, была выдвинута диффузионная теория, которая подразумевала, что под воздействием записывающего излучения связи легирующих примесей разрушаются. При воздействии высокой температуры может происходить полная диссоциация и диффузия отдельных примесных атомов из экспонированных участков решетки

в неэкспонированные и в оболочку. M. Fokine 2002 году в своей работе назвал такой тип решеток CCG – Chemical Composition Gratings [28, 29]. Эффект диффузии материала сердцевины в оболочку из облученных участков при отжиге ВБР проявляется, например, в волокнах с сердцевиной, легированной азотом [30,31].

Следует отметить, что большинство регенерируемых решеток наблюдались в образцах, запись которых проводилась в германосиликатных волокнах, насыщенных молекулярным водородом. Германий является довольно большим атомом, имеющим большое количество связей в структуре стекла и его диффузия маловероятна. В этом случае ключевую роль может играть водород. Была предложена теория, в которой основой формирования регенерируемых ВБР предполагалось образование молекулярной воды и диффузия ОН групп. Наличие в процессе записи молекулярного водорода, как стандартного средства повышения фоточувствительности, приводит к возможности образования ОН групп на этапе записи решетки. Далее эти ОН группы могут диффундировать и достраиваться до полноценной молекулы H_2O , которая и будет ответственна за термостабильные изменения показателя преломления [25,32]. Но данная теория также не описывает в полной мере все наблюдаемые явления. Так, например, регенерация может наблюдаться в волокнах с высоким содержанием германия в сердцевины, решетки в которых были записаны без применения молекулярного водорода [33-37].

Как и в случае теории записи решеток, ряд авторов отдают ключевую роль в формировании регенерируемых брэгговских решеток, перераспределению напряжений в стекле при отжиге брэгговской структуры, что может приводить к появлению модуляции плотности материала волокна [38,39]

И, наконец, теории, которые очень неуверенно, но начали появляться в литературе, связаны с эффектом кристаллизации стекла. В некоторых работах данная теория только озвучивается как один из возможных механизмов [34], в других – присутствует попытка объяснить возможное влияние образующихся кластеров на формирование регенерируемой решетки [14,25,40]. Как правило,

такая теория кристаллизации неразрывно связана с присутствующими напряжениями в сетке стекла, в особенности на границе сердцевина/оболочка, и их возможной трансформацией. Немаловажная роль отводится и водороду, который является фактором создания модуляции напряжений в стекле, что и приводит, по мнению авторов, к неравномерной кристаллизации, образующей новую, регенерировавшую решетку [14,25,41]. Однако регенерация решеток наблюдалась и в волокне с полностью удаленной оболочкой, что свидетельствует о наличии механизмов формирования регенерируемой брэгговской структуры внутри сердцевины [42], а также, как отмечалось выше, в волокнах, не прошедших этап насыщения молекулярным водородом.

Как можно видеть, до сих пор не существует стройной теории регенерации. Регенерируемые решетки могут наблюдаться как в высоколегированных, так и низколегированных волокнах, в присутствии водорода или без, записанные УФ-излучением или импульсами фемтосекундного лазера. В данной работе мы впервые демонстрируем регенерацию решетки, записанной методом поточечной записи излучением фемтосекундного лазера. Принципиальным отличием при записи такой структуры является создание локальных, малых по размеру, дефектов в сердцевине волоконного световода, не имеющих прямого контакта с границей сердцевина/оболочка. В статье выдвигается оригинальная гипотеза формирования регенерируемой решетки за счет кристаллизации стекла непосредственно в облученных участках волокна.

1. Эксперимент

Решетки, рассматриваемые в рамках данной статьи, записывались методом направленной записи Point-By-Point в режиме Single Shot. В качестве записывающего излучения используется вторая гармоника фемтосекундного лазера Optosystems FL 300 с длительностью импульса порядка 320 фс, длина волны излучения второй гармоники $\lambda=532$ нм. Более подробно про запись ВБР написано в статьях [43,44]. Запись ВБР производилась

в волокне Corning SMF-28 без снятия защитного покрытия. Особо отметим, что волокно не насыщалось молекулярным водородом.

В качестве образца для сравнения был изготовлен образец ВБР, записанный в слаболегированном германосиликатном телекоммуникационном волокне Corning SMF-28. Запись производилась классическим методом, при помощи УФ излучения эксимерного лазера 193 нм и фазовой маски, без предварительного насыщения волокна молекулярным водородом [45]. Ввиду слабого уровня легирования сердцевины волокна, формирование такой решетки требует значительного времени экспонирования. При этом могут проявляться эффекты, нехарактерные для решеток, записанных в присутствии водорода, в которых для записи брэгговской структуры требуется многократно меньшее время.

Полученные таким образом решетки далее помещались в трубчатую печь (Рис. 1) Nabertherm R50/500/12 и подвергались длительному отжигу при температуре 650 °С. Спектры отжигаемых решеток сканировались с помощью анализатора оптического спектра Agilent 86140В в автоматическом режиме.

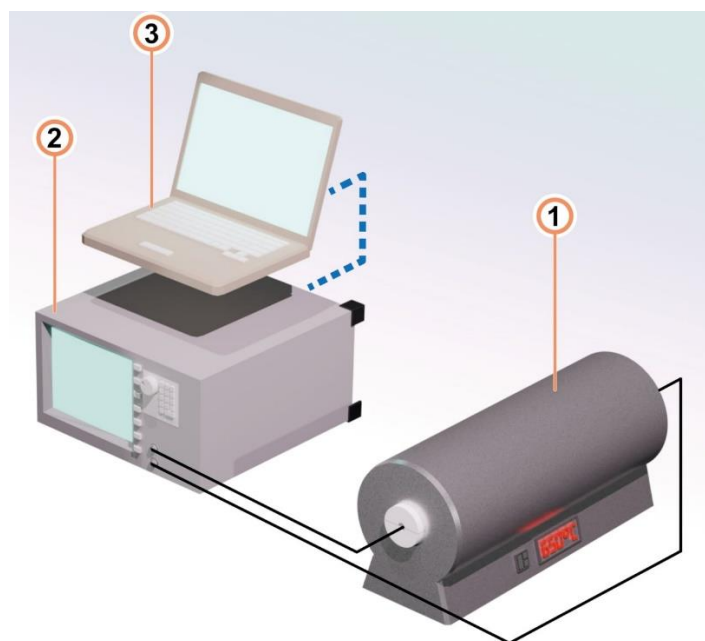


Рис. 1. Схема автоматизированной экспериментальной установки для изотермического отжига.

1 – трубчатая печь, 2 – анализатор спектра Agilent 86140В со встроенным источником излучения, 3 – компьютер.

Для исследования экспериментальных образцов был выбран метод длительного изотермического отжига [46-53]. В простейшем случае процесс отжига волоконных брэгговских решеток можно рассматривать как процесс, обратный записи. На этапе создания ВБР в зоне лазерного воздействия происходит локальная трансформация материала сердцевинки волокна, что приводит к модуляции показателя преломления. В общем случае можно считать, что при облучении сердцевинки создаются некоторые локальные дефекты, которые имеют свою характерную энергию активации. Вероятность релаксации данных дефектов зависит от температуры и времени воздействия, а сам процесс релаксации в макромасштабе описывается степенным законом, представленном в феноменологической модели энергетических ловушек Эрдогана [54]. Данный метод изотермического отжига позволяет подробно изучить динамику распада решеток в зависимости только от времени, исключая влияние температуры (флуктуаций температуры), рассматривая ее только как параметр. Однако данная модель не описывает необратимые изменения, происходящие, например, при регенерации решетки, при описанных выше необратимых процессах диффузии или кристаллизации. Такие изменения будут проявляться на кривой изотермического отжига в виде отклонения от «классической» степенной функции деградации решетки.

2. Результаты и обсуждение

Для удобства и более корректного анализа результатов в данной работе отражательная способность решетки представлена в виде нормированного параметра (Normalized Integrated Couple Constant – NICC), который был рассчитан по формуле (1) [54]:

$$NICC = \frac{\tanh^{-1}(\sqrt{R})}{\tanh^{-1}(\sqrt{R_0})}, \quad (1)$$

где R – текущий коэффициент отражения решетки, а R_0 – коэффициент отражения решетки до начала эксперимента.

Напомним, что коэффициент отражения брэгговской решетки [55] определяется как (2):

$$R = \tanh^2 \left(\frac{\pi \eta \Delta n_{\text{mod}} L}{\lambda_B} \right) = \tanh^2 (\kappa L) \quad (2)$$

где η – интеграл перекрытия, определяющий долю мощности, распространяющейся по сердцевине волоконного световода, Δn_{mod} – модуляция показателя преломления на длине решетки, L – длина решетки, λ_B – длина волны брэгговского резонанса. Более обобщенным и универсальным параметром является сила решетки κ , который и определяет в общем случае величину эффекта, производимого структурой решетки на распространяющееся по волокну излучение на брэгговской длине волны.

Рассмотрим результаты, полученные на образце, записанном с помощью ультрафиолетового излучения с помощью эксимерного ArF-лазера. Как было отмечено выше, запись такой решетки в ненаводороженном слаболегированном волокне требует длительного времени экспонирования и сопровождается двумя эффектами – изменением показателя преломления облучаемых участков сердцевины за счет эффекта фоточувствительности, т.е. образования новых центров поглощения на фотоиндуцированных дефектах и уплотнением материала в облучаемых участках. Второй эффект приводит к модуляции плотности стекла вдоль сердцевины волоконного световода, вносящий дополнительный эффект модуляции показателя преломления [39 56]. Очевидно, что, хотя эти два эффекта и связаны между собой, релаксация напряжения и восстановление нарушенных связей может происходить с разной эффективностью и зависеть от времени и температуры воздействия. Как следствие, кривая изотермического распада может иметь неоднородность, обусловленную этими двумя механизмами.

На рисунке 2 представлены результаты длительного изотермического отжига данной решетки. В нашем эксперименте решетка отжигалась на протяжении 6 месяцев при температуре 650 °С. На первом этапе наблюдается

«классический» распад решетки по экспоненциальному закону, который связан с частичным распадом фотоиндуцированных центров. Интересно, что данный этап сопровождается значительным уменьшением брэгговской длины волны, которое превосходит по модулю изменение длины волны отражения решетки при ее записи. Данный эффект может быть связан с релаксацией структуры кварцевого стекла, особенно в наиболее напряженных участках на границе сердцевина-оболочка. Такая релаксация вызывает изменение эффективного показателя преломления для распространяющейся моды излучения и напрямую не связана с эффектом распада самой брэгговской решетки. Однако, после примерно 60 часов термического воздействия начинается новый этап распада ВБР. При этом динамика изменения брэгговской длины волны меняет знак. Можно предположить, что такое изменение вызвано, по всей видимости, уже релаксацией, фотоиндуцированных, в первую очередь, продольных, напряжений внутри сердцевины, уменьшая модуляцию плотности внутри брэгговской решетки. Помимо этого, данный процесс понижает потенциальный барьер восстановления оставшихся фотоиндуцированных центров окраски, которые активно начинают релаксировать, также приводя к уменьшению контраста ВБР. Увеличение брэгговской длины волны на данном этапе отчасти обусловлено именно релаксацией продольных напряжений, определяющих отрицательный вклад в средний показатель преломления фотоиндуцированной решетки. Третий этап отжига характеризуется остаточными эффектами релаксации фотоиндуцированных центров без видимых эффектов релаксации напряжений, о чем свидетельствует незначительная флуктуация брэгговской длины волны. При этом ее дальнейший рост на поздних этапах отжига обуславливается, по всей видимости, уже пластичной деформацией (удлинением) волокна и, не связан напрямую с термической эволюцией брэгговской структуры.

Таким образом, динамика распада, как обратный процесс по отношению к записи брэгговской решетки, сопровождается двумя эффектами – восстановлением фотоиндуцированных центров и релаксацией

внутренних напряжений в сетке стекла, обуславливающих, в том числе, дополнительную модуляцию показателя преломления вдоль сердцевины. При этом, данные эффекты связаны между собой, о чем свидетельствует неоднородная динамика распада решетки. Отметим, что никаких эффектов регенерации решетки, записанной с помощью ультрафиолетового излучения, обнаружено не было.

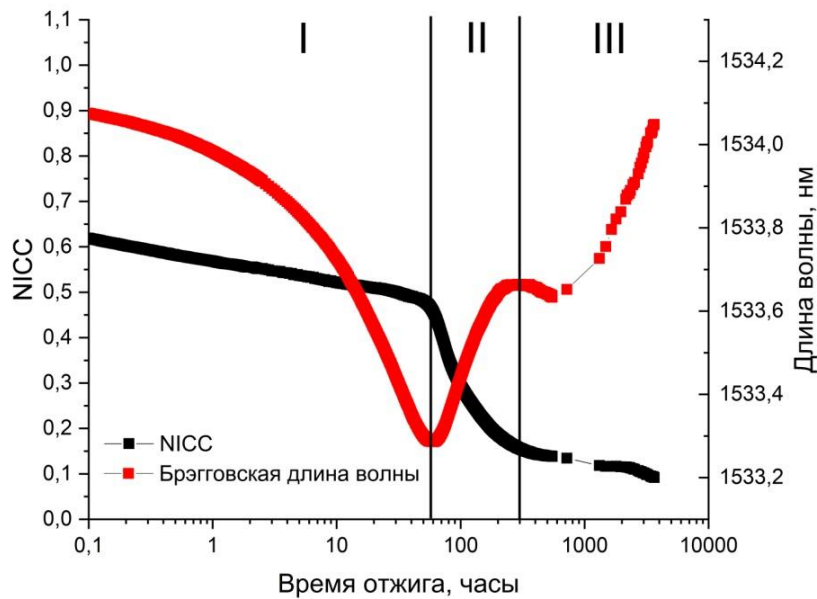


Рис. 2 Динамика термического отжига решетки, записанной ультрафиолетовым излучением.

Несколько иная картина наблюдается в образцах, записанных поточечным методом при помощи фемтосекундного излучения в том же самом волокне SMF-28 (Рис. 3). В процессе такой записи происходит формирование точечного дефекта в сердцевине, сопровождающееся, также как и в случае интенсивной УФ-записи, уплотнением сетки стекла в точке лазерного воздействия и возникновением дополнительных растягивающих напряжений в ближайшем окружении данного дефекта. В отличие от УФ-дефекта, где подобные напряжения вызывают модуляцию показателя преломления вдоль оси волоконного световода, точечное воздействие фемтосекундным излучением приводит к появлению напряжений в объеме стекла вокруг дефекта. Другим важным отличием является воздействие излучения на регулярную сетку стекла,

приводящую за счет многофотонных процессов к возбуждению не только связей, ассоциированных с присутствием германия, но и регулярной структуры Si-O. Кроме того, высокая интенсивность излучения определяет высокую вероятность возбуждения более одной связи атома, что приводит к практически необратимой трансформации структуры стекла под действием внутренних напряжений с крайне высоким потенциальным барьером. Такая трансформация может обеспечить высокую термическую устойчивость решеток, записанных излучением фемтосекундного лазера.

Здесь следует обратить внимание на схожесть поведения брэгговской длины волны при термическом отжиге у решеток, записанных ультрафиолетовым излучением и излучением фемтосекундного лазера (Рис. 4). Брэгговская длина волны «фемтосекундных» решеток практически полностью повторяет динамику ультрафиолетовой ВБР за исключением величины роста длины волны на втором этапе трансформации. Это свидетельствует о схожести эффектов, происходящих в брэгговских структурах и определяемых, в первую очередь, структурой и типом волоконного световода. На этом факте будут построены дальнейшие рассуждения.

Как и в случае образца, записанного УФ-излучением, динамику термического отжига решетки можно разделить на три фазы. На первом этапе, также как и с УФ-образцом, наблюдается значительное уменьшение брэгговской длины волны с той лишь разницей, что отражательная способность решетки сохраняется. В ходе первого этапа еще сохраняется аксиальное распределение напряжений вокруг фотоиндуцированных центров лазерного фемтосекундного воздействия, которые находятся в центре сердцевины, вдали от границы сердцевина/оболочка, что и определяет сохранение уровня отражения решетки.

Второй этап характеризуется падением и частичным восстановлением уровня отражения, т.е. этапом возникновения регенерируемой брэгговской решетки. По всей видимости, природа данного явления связана с процессами кристаллизации внутри фотоиндуцированных дефектов. В общем случае

эффективная кристаллизация кварцевого стекла происходит при более высоких температурах, обычно в диапазоне температур 1100-1600 °С. При большей температуре стекло начинает плавиться, препятствуя образованию кристаллов, при более низкой – имеет слишком высокую вязкость, что препятствует необходимой трансформации для роста кристаллов [57, 58]. Однако, в случае фотоиндуцированных центров следует учесть, что они содержат много нарушенных связей регулярной сетки стекла, что обуславливает повышенную подвижность структурных элементов стекла – тетраэдров и возможность их перестройки с образованием кристаллических элементов. В литературе было показано, что эффективный рост кристаллов и эффективное образование зародышевых центров протекает при различных температурах. так, например, в стекле Suprasil 2 при поверхностной кристаллизации при температуре 700 °С наблюдается образование малого количества крупных областей кристаллизации в течение нескольких часов, тогда как при температуре 500 °С образуется большая концентрация малых зародышевых центров при отжиге в течение нескольких суток [59]. Из-за ограниченной подвижности структурных элементов в облученных участках брэгговских решеток можно ожидать именно такое образование зародышевых центров в большом количестве, что и обуславливает образование регенерируемой брэгговской решетки. Изменение уровня отражения с одной стороны связано с продолжающимися процессами релаксации, в том числе и фотоиндуцированной аксиальной модуляции плотности, что уменьшает начальный контраст решетки, а с другой – с образованием кристаллических центров, формируемых, фактически, новую структуру брэгговской решетки. Образование кристаллических центров сопровождается уплотнением и созданием новых центров напряжений, что находит свое подтверждение при анализе их радиального распределения в регенерированной решетке [38]. Именно эти эффекты определяют динамику изменения отражения брэгговской структуры. На третьем этапе наблюдается стабилизация уровня отражения

решетки, что связано с замедлением, эффектом насыщения процесса формирования новых кристаллических центров.

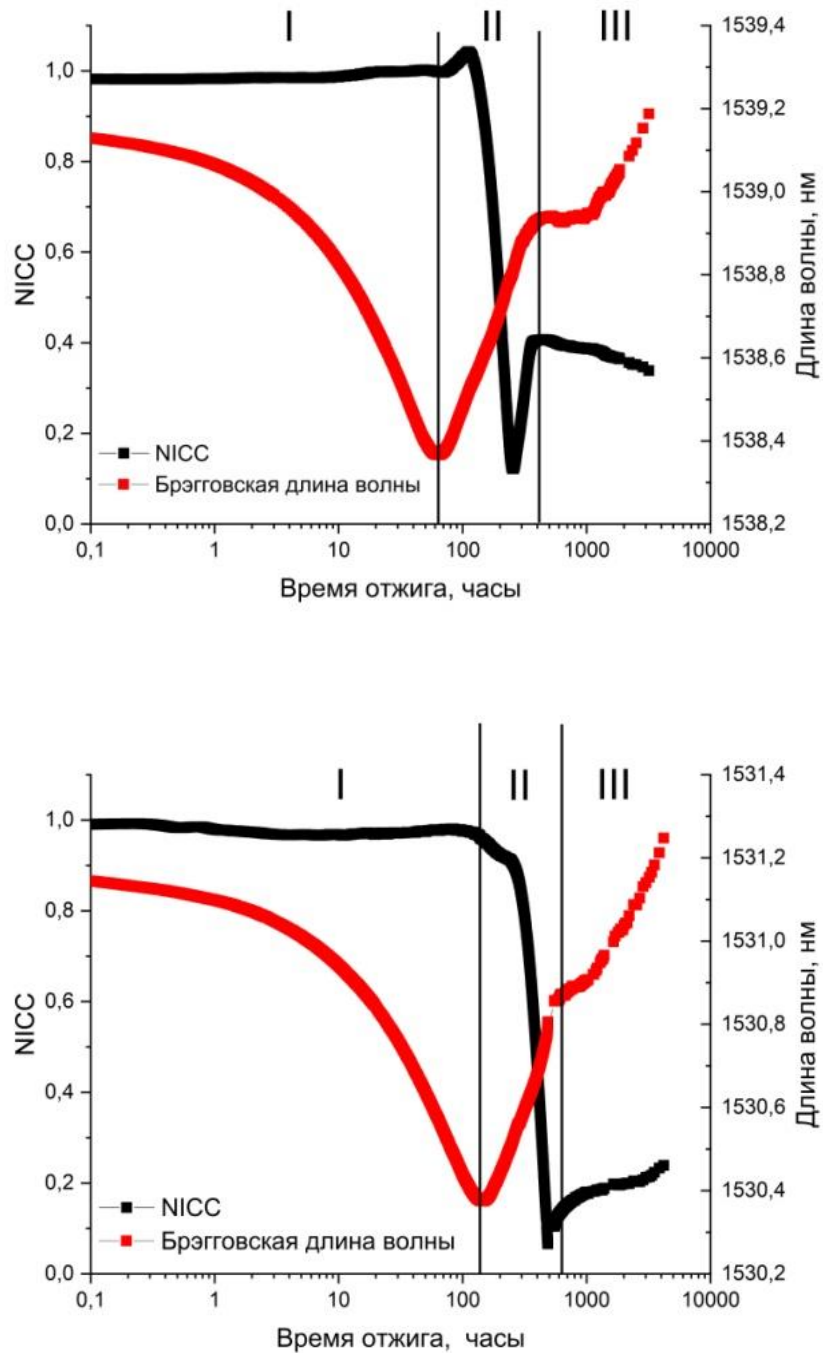


Рис. 3 Динамика термического отжига двух образцов ВБР, записанных поточечным методом излучением fs-лазера.

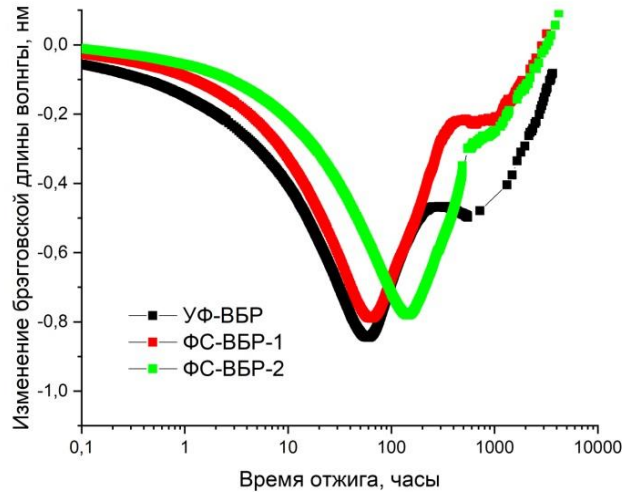


Рис. 4 Динамика изменения брэгговской длины волны в процессе изотермического отжига для различных образцов ВБР.

Таким образом, в данной работе был продемонстрирован классический процесс появления регенерируемой решетки, который впервые наблюдался без присутствия молекулярного водорода в низколегированном германием волоконном световоде с решеткой, записанной поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера. Наблюдаемые изменения брэгговской длины волны в большей степени связаны с перераспределением напряжений внутри кварцевого стекла, а также с продольной деформацией волоконного световода в процессе эксперимента.

Гипотеза о главенствующей роли кристаллизации материала стекла в облученных участках при формировании регенерируемых брэгговских решеток может быть распространена и на другие типы ВБР. Так, например, наблюдается регенерация решеток, записанных УФ-излучением в высоколегированных волокнах без присутствия водорода [33-37]. Высоколегированное германосиликатное волокно имеет меньшую температуру плавления, а, соответственно, и температуру формирования кристаллов. В этом случае даже наличие небольшого количества фотоиндуцированных дефектов может являться прекурсором образования кристаллов, особенно при повышенных температурах. Дополнительным подтверждением данной теории является

обратная зависимость температуры образования регенерируемой решетки от концентрации германия в сердцевине волоконного световода [37].

Заключение

В данной работе был продемонстрирован классический процесс появления регенерируемой решетки, который впервые наблюдался в низколегированном германием волоконном световоде Corning SMF-28 с решеткой, записанной без присутствия молекулярного водорода поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера. Термический отжиг проводился при фиксированной температуре 650 С. Процесс регенерации связывается с образованием зародышевых центров кристаллизации в облученных участках волокна, появление которых при данной температуре становится возможным благодаря большому количеству фотоиндуцированных разрывов регулярных связей и, как следствие повышенной подвижности структурных элементов кварцевого стекла. Гипотеза о главенствующей роли кристаллизации может быть распространена и на другие типы волокон и ВБР, демонстрирующих процесс регенерации при высоких температурах.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Fiber bragg gratings. / Kashyap R.: Academic press, 2009. ISBN: 978-0-12-372579-9 <https://doi.org/10.1016/C2009-0-16830-7>
2. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation. / Cusano A., Cutolo A., Albert J.: Bentham Science Publishers, 2011. ISBN: 978-1-60805-084-0 <https://doi.org/10.2174/97816080508401110101>
3. Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C., Kawasaki B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Applied physics letters. – 1978. – Т. 32, № 10. – С. 647-649. <https://doi.org/10.1063/1.89881>

4. Fiber optic sensors: fundamentals and applications. / Krohn D. A., MacDougall T., Mendez A.: Spie Press Bellingham, WA, 2014. <https://doi.org/10.1117/3.1002910>
5. Othonos A. Fiber bragg gratings // Review of scientific instruments. – 1997. – Т. 68, № 12. – С. 4309-4341. <https://doi.org/10.1063/1.1148392>
6. Smirnov A. M., Bazakutsa A. P., Chamorovskiyy Y. K., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Butov O. V. Thermal switching of lasing regimes in heavily doped Er³⁺ fiber lasers // ACS Photonics. – 2018. – Т. 5, № 12. – С. 5038-5046. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01298>
7. Vasil'ev S. A., Medvedkov O. I., Korolev I. G. e., Bozhkov A. S., Kurkov A. S., Dianov E. M. Fibre gratings and their applications // Quantum electronics. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085. <https://doi.org/10.1070/QE2005v035n12ABEH013041>
8. Lemaire P. J., Atkins R., Mizrahi V., Reed W. High pressure h/sub 2/loading as a technique for achieving ultrahigh uv photosensitivity and thermal sensitivity in geo/sub 2/doped optical fibres // Electronics Letters. – 1993. – Т. 13, № 29. – С. 1191-1193. <https://doi.org/10.1049/el:19930796>
9. Partovi A., Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P., Glass A., Fleming J. Volume holographic storage in hydrogen treated germano-silicate glass // Applied physics letters. – 1994. – Т. 64, № 7. – С. 821-823. <https://doi.org/10.1063/1.111025>
10. Lancry M., Niay P., Bailleux S., Douay M., Depecker C., Cordier P., Riant I. Thermal stability of the 248-nm-induced presensitization process in standard H 2-loaded germanosilicate fibers // Applied optics. – 2002. – Т. 41, № 34. – С. 7197-7204. <https://doi.org/10.1364/AO.41.007197>
11. Leconte B. Contribution à l'étude de la photosensibilité des fibres en silice sous l'effet d'une insolation par un laser à ArF; Lille 1, 1998.
12. Patrick H., Gilbert S. L., Lidgard A., Gallagher M. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber // Journal of applied physics. – 1995. – Т. 78, № 5. – С. 2940-2945. <https://doi.org/10.1063/1.360753>

13. Chanet N. et al. Design and integration of femtosecond Fiber Bragg gratings temperature probes inside actively cooled ITER-like plasma-facing components //Fusion Engineering and Design. – 2021. – Т. 166. – С. 112376. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112376>
14. Polz L. et al. Regenerated Fibre Bragg Gratings: A critical assessment of more than 20 years of investigations //Optics & Laser Technology. – 2021. – Т. 134. – С. 106650. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106650>
15. Mihailov S. J. Femtosecond laser-induced Bragg gratings in silica-based fibers for harsh environment sensing //APL Photonics. – 2023. – Т. 8. – №. 7. <https://doi.org/10.1063/5.0142798>
16. Dedyulin S. et al. Accurate measurements of a wavelength drift in high-temperature silica-fiber Bragg gratings //Metrology. – 2021. – Т. 1. – №. 1. – С. 1-16. <https://doi.org/10.3390/metrology1010001>
17. Deng Y., Jiang J. Optical fiber sensors in extreme temperature and radiation environments: A review //IEEE Sensors Journal. – 2022. – Т. 22. – №. 14. – С. 13811-13834. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3181949>
18. Grobncic D. et al. Fiber Bragg grating wavelength drift in long-term high temperature annealing //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 4. – С. 1454. <https://doi.org/10.3390/s21041454>
19. Canning J. Fibre gratings and devices for sensors and lasers // Laser & Photonics Reviews. – 2008. – Т. 2, № 4. – С. 275-289. <https://doi.org/10.1002/lpor.200810010>
20. Mihailov S. J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments // Sensors. – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 1898-1918. <https://doi.org/10.3390/s120201898>
21. Wang Q., Jewart C. M., Canning J., Grobncic D., Mihailov S. J., Chen K. P. High-temperature fiber Bragg grating sensors in microstructured fibers for harsh environment applications // Fiber Optic Sensors and Applications VII. – Т. 7677 – SPIE, 2010. – С. 119-125. <https://doi.org/10.1117/12.851778>
22. Smelser C. W., Mihailov S. J., Grobncic D. Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask // Optics express. – 2005. – Т. 13, № 14. – С. 5377-5386. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.005377>

23. Smelser C. W., Grobnic D., Mihailov S. J. High-Reflectivity Thermally Stable Ultrafast Induced Fiber Bragg Gratings in H₂ -Loaded SMF-28 Fiber // IEEE Photonics Technology Letters. – 2009. – Т. 21, № 11. – С. 682-684. <https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2016352>
24. Li Y., Yang M., Wang D., Lu J., Sun T., Grattan K. Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation // Optics express. – 2009. – Т. 17, № 22. – С. 19785-19790. <https://doi.org/10.1364/OE.17.019785>
25. Canning J., Stevenson M., Bandyopadhyay S., Cook K. Extreme silica optical fibre gratings // Sensors. – 2008. – Т. 8, № 10. – С. 6448-6452. <https://doi.org/10.3390/s8106448>
26. Mohd Nazal N., Lai M.-H., Lim K.-S., Gunawardena D. S., Chong W.-Y., Yang H.-Z., Ahmad H. Demarcation energy properties of regenerated fiber Bragg grating sensors in few-mode fibers // Optica Applicata. – 2018. – Т. 48, № 2. <https://doi.org/10.5277/oa180209>
27. Yang H. Z., Qiao X. G., Das S., Paul M. C. Thermal regenerated grating operation at temperatures up to 1400 C using new class of multimaterial glass-based photosensitive fiber // Optics letters. – 2014. – Т. 39, № 22. – С. 6438-6441. <https://doi.org/10.1364/OL.39.006438>
28. Fokine M. Thermal stability of chemical composition gratings in fluorine–germanium-doped silica fibers // Optics Letters. – 2002. – Т. 27, № 12. – С. 1016-1018. <https://doi.org/10.1364/OL.27.001016>
29. Fokine M. Thermal stability of oxygen-modulated chemical-composition gratings in standard telecommunication fiber // Optics letters. – 2004. – Т. 29, № 11. – С. 1185-1187. <https://doi.org/10.1364/OL.29.001185>
30. Butov O. V., Golant K. M., Nikolin I. V. Ultra-thermo-resistant Bragg gratings written in nitrogen-doped silica fibres // Electronics Letters. – 2002. – Т. 38. – №. 11. – С. 523-525. <https://doi.org/10.1049/el:20020343>

31. Butov O. V., Golant K. M. Core-cladding structure transformation in silica optical fibers caused by UV-induced Bragg grating inscription //Proceedings of XX International Congress on Glass. – The Ceramic Society of Japan, Tokyo, Japan, 2004. <https://doi.org/10.13140/2.1.1579.1040>
32. Zhang B., Kahrizi M. High-temperature resistance fiber Bragg grating temperature sensor fabrication // IEEE sensors journal. – 2007. – Т. 7, № 4. – С. 586-591. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.891941>
33. Lindner E., Canning J., Chojetzki C., Brückner S., Becker M., Rothhardt M., Bartelt H. Thermal regenerated type IIa fiber Bragg gratings for ultra-high temperature operation // Optics communications. – 2011. – Т. 284, № 1. – С. 183-185. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.08.075>
34. Lindner E., Chojetzki C., Brückner S., Becker M., Rothhardt M., Bartelt H. Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers // Optics express. – 2009. – Т. 17, № 15. – С. 12523-12531. <https://doi.org/10.1364/OE.17.012523>
35. Lindner E. et al. Arrays of regenerated fiber Bragg gratings in non-hydrogen-loaded photosensitive fibers for high-temperature sensor networks //Sensors. – 2009. – Т. 9. – №. 10. – С. 8377-8381. <https://doi.org/10.3390/s91008377>
36. Bueno A. et al. Fast thermal regeneration of fiber Bragg gratings //Optics letters. – 2013. – Т. 38. – №. 20. – С. 4178-4181. <https://doi.org/10.1364/OL.38.004178>
37. Kumar J. et al. Studies on thermal regeneration and temperature stability of type-I FBGs written in Ge–B codoped and Ge doped fibers by a kHz repetition rate nanosecond 255 nm beam //Optics Communications. – 2014. – Т. 320. – С. 109-113. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.01.049>
38. Lancry M. et al. Investigation of structural glass relaxation in regenerated fiber Bragg gratings //Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides. – Optica Publishing Group, 2016. – С. JT4A. 27. <https://doi.org/10.1364/ACOFT.2016.JT4A.27>

39. Celikin M. et al. Enhanced stability of higher UV-densified Fiber Bragg Gratings after thermal regeneration // Optics Communications. – 2019. – Т. 435. – С. 345-349. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.11.049>
40. Lu L., Yang Y. The Formation Mechanism for Regenerated Fiber Bragg Grating Based on Non-uniform Crystallization // Optical Fiber Sensors. – Optica Publishing Group, 2023. – С. W4. 56. <https://doi.org/10.1364/OFS.2023.W4.56>
41. Bandyopadhyay S., Canning J., Biswas P., Stevenson M., Dasgupta K. A study of regenerated gratings produced in germanosilicate fibers by high temperature annealing // Optics express. – 2011. – Т. 19, № 2. – С. 1198-1206. <https://doi.org/10.1364/OE.19.001198>
42. Yang H. et al. Thermal regeneration in etched-core fiber Bragg grating // IEEE Sensors Journal. – 2013. – Т. 13. – №. 7. – С. 2581-2585. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2256344>
43. Przhiiialkovskii D. V., Butov O. V. High-precision point-by-point fiber Bragg grating inscription // Results in Physics. – 2021. – Т. 30. – С. 104902. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104902>
44. Пржиялковский Д. В., Бутов О. В. ВЫСОКОТОЧНАЯ ЗАПИСЬ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ПОТОЧЕЧНЫМ МЕТОДОМ // ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА APPLIED PHOTONICS. – 2022. – С. 50. <http://doi.org/10.15593/2411-4367/2021.3.05>
45. Butov O. V. Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers // Results in Physics. – 2019. – Т. 15. – С. 102542. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102542>
46. Patrick H., Gilbert S. L., Lidgard A., Gallagher M. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber // Journal of applied physics. – 1995. – Т. 78, № 5. – С. 2940-2945. <https://doi.org/10.1063/1.360753>
47. Kannan S., Guo J. Z., Lemaire P. J. Thermal stability analysis of UV-induced fiber Bragg gratings // Journal of lightwave technology. – 1997. – Т. 15, № 8. – С. 1478-1483. <https://doi.org/10.1109/50.618380>

48. Dong L., Liu W. Thermal decay of fiber Bragg gratings of positive and negative index changes formed at 193 nm in a boron-codoped germanosilicate fiber // Applied optics. – 1997. – Т. 36, № 31. – С. 8222-8226. <https://doi.org/10.1364/AO.36.008222>
49. Chisholm K., Sugden K., Bennion I. Effects of thermal annealing on Bragg fibre gratings in boron/germania co-doped fibre // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1998. – Т. 31, № 1. – С. 61. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/1/009>
50. Åslund M., Canning J. Annealing properties of gratings written into UV-presensitized hydrogen-outdiffused optical fiber // Optics Letters. – 2000. – Т. 25, № 10. – С. 692-694. <https://doi.org/10.1364/OL.25.000692>
51. Razafimahatratra D., Niay P., Douay M., Poumellec B., Riant I. Comparison of isochronal and isothermal decays of Bragg gratings written through continuous-wave exposure of an unloaded germanosilicate fiber // Applied Optics. – 2000. – Т. 39, № 12. – С. 1924-1933. <https://doi.org/10.1364/AO.39.001924>
52. Wang Q., Hidayat A., Niay P., Douay M. Influence of blanket postexposure on the thermal stability of the spectral characteristics of gratings written in a telecommunication fiber using light at 193 nm // Journal of Lightwave Technology. – 2000. – Т. 18, № 8. – С. 1078-1083. <https://doi.org/10.1109/50.857753>
53. Fokine M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers // JOSA B. – 2002. – Т. 19, № 8. – С. 1759-1765. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.19.001759>
54. Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P., Monroe D. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings // Journal of applied physics. – 1994. – Т. 76, № 1. – С. 73-80. <https://doi.org/10.1063/1.357062>
55. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Божков А. С., Курков А. С., Дианов Е. М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085-1103. <https://doi.org/10.1070/QE2005v035n12ABEH013041>

56. Douay M. et al. Densification involved in the UV-based photosensitivity of silica glasses and optical fibers //Journal of Lightwave technology. – 1997. – Т. 15. – №. 8. – С. 1329-1342. <https://doi.org/10.1109/50.618334>
57. Таганцев Д. К. Стеклообразные материалы: учебное пособие для вузов по направлению подготовки магистров» Техническая физика». – 2010. ISBN 978-5-7422-3238-4
58. G. Tammann, Die Aggregatzustände, Leopold Voss, Leipzig, 1922
59. Lezzi P. J. et al. Surface crystallization and water diffusion of silica glass fibers: Causes of mechanical strength degradation //Journal of the American Ceramic Society. – 2015. – Т. 98. – №. 8. – С. 2411-2421. <https://doi.org/10.1111/jace.13597>

Для цитирования:

Пржиялковский Д.В., Плюскова Н.А., Бутов. О.В Регенерация волоконных брэгговских решеток, записанных поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.6>