

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОДНОРОДНЫХ ФАЗОВЫХ СТРУКТУР В ОБЪЕМЕ СТЕКЛА N-BK7 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

А.С. ЕРЕМЯН^{1*}, М.Л. САРГСЯН¹, П.К. ГАСПАРЯН²

¹Институт синхротронных исследований КЕНДЛ, Ереван, Армения

²Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: yeremyan@asls.candle.am

(Поступила в редакцию 11 февраля 2020 г.)

Исследуется возможность применения метода прямой лазерной записи для создания однородных фазовых структур больших размеров в объеме боросиликатного стекла N-BK7. Исследована зависимость морфологии и типа модификаций, индуцируемых в объеме стекла субпикосекундными (500 фс) импульсами от энергетической дозы облучения. Показано, что при умеренной фокусировке и энергиях импульса ниже порога эффектов самофокусировки, возможно выбрать режимы записи (скорость сканирования, частота следования импульсов), позволяющие послойным сканированием изготавливать протяженные структуры с сплошной модификацией показателя преломления стекла. При больших пиковых мощностях лазера керровские нелинейности влияют на распространение импульсов и на динамику процессов генерации плазмы и релаксации, а формирующиеся структуры существенно неоднородны с переменным знаком изменения показателя преломления. Для подтверждения применимости подхода изготовлена заглубленная фазовая структура больших размеров, проявляющая довольно однородное изменение показателя преломления по всей обработанной области.

1. Введение

Микрообработка прозрачных веществ с использованием лазеров с ультракороткими импульсами является предметом интенсивных исследований и находит все более широкое применение в качестве метода для изготовления приборов и компонентов оптоэлектроники и интегральной оптики. Одним из наиболее изучаемых и широко применяемых свойств данного метода является возможность прямой прецизионной записи 3D структур в стеклах, кристаллах и полимерах [1–6]. Преимуществом использования ультракоротких (порядка или меньше пикосекунды) импульсов для данного типа записи является возможность достижения экстремально высоких интенсивностей и инициирования процессов нелинейного (многофотонного) поглощения в точно заданных областях внутри вещества. В результате, в областях микро и нанометрических масштабов могут быть

осуществлены режимы воздействия лазерного излучения, приводящие к различного рода структурным или фазовым изменениям и, как следствие, к модификации локальных оптических свойств вещества – от плавного изменения показателя преломления до формирования микропустот или двулучепреломляющих зон [7–9].

Среди указанных выше типов модификаций изменение показателя преломления (ИПП) представляет, пожалуй, наибольший интерес в связи с большим потенциалом практических применений. В частности, возможность индуцирования положительного ИПП рассматривается в качестве прямого и недорогого метода для получения активных и пассивных волноводов в кристаллах и стеклах [2,6,10–14], а также фильтров и множества других пассивных элементов интегральной оптики [1–5].

В качестве прозрачной среды для индицирования ИПП и изготовления приборов на этой основе особый интерес вызывают плавленый кварц и боросиликатное стекло ВК7, ввиду широкого применения последних в оптической и оптоволоконной технике. Обладая схожими оптическими свойствами в видимом диапазоне, эти стекла, вместе с тем, характеризуются значительно отличающимися (приблизительно в 10 раз) коэффициентами теплового расширения. Из-за этого тепломеханическая релаксация при импульсно-лазерной обработке происходит в них по-разному, а результирующие структуры могут иметь различный тип и морфологию при одинаковых условиях облучения образцов. Так, в ряде работ показано [4,5,14], что при умеренной фокусировке и не слишком высоких энергиях импульса релаксация возбуждения в кварцевом стекле может сопровождаться формированием как уплотненных, так и разреженных зон вблизи области распределения плазмы в образце. В то же время, в аналогичных условиях облучения лазерный трек (след) в ВК7, как правило, представляет из себя разреженную область [13,14], что, предположительно, связано с значительно большим значением коэффициента теплового расширения. С практической точки зрения это означает, что получение положительного ИПП и, следовательно, прямая запись волноводной структуры в стекле ВК7 затруднительны.

Характерным недостатком рассматриваемого метода прямой лазерной записи (ПЛЗ) является пространственная неоднородность модифицированной области [3–5]. Это ограничивает применение метода, например, для создания волноводов с малыми потерями или фазовых элементов с плавными пропускными характеристиками. Механизмы, ответственные за пространственную зависимость ИПП (включая указанные выше особенности для кварца и ВК7) до конца не выяснены и до сих пор активно изучаются. Однако, указанную неоднородность области структурирования следует ожидать уже из специфики метода ПЛЗ, состоящей в неравномерности распределения энергии сфокусированного

импульса в области взаимодействия с веществом. Исходя из этого, для контроля над формой и структурой области модификации применяются различные методы, включая управление волнового фронта и изменение пространственной формы лазерного импульса, использование масок или апертур для симметризации зоны взаимодействия и т.п. [4,15–18]. В большинстве, эти меры специфичны, и эффективность их применения зависит от типа решаемой задачи. Особые трудности из-за неоднородности лазерно-индуцированного трека возникают при необходимости записи протяженных (с высоким соотношением продольных и поперечных размеров) структур или фазовых элементов больших размеров.

В данной работе исследуется возможность создания однородных фазовых структур большого размера, вписанных в объем стекла ВК7 путем высокоточного сканирования лазером с фемтосекундной длительностью импульсов. После описания экспериментального метода и использованных подходов, на основе микроскопических исследований индуцированных структур выявляются и обсуждаются режимы обработки, позволяющие получить однородные структуры большой протяженности путем послойного сканирования. Результаты обсуждены с точки зрения их применения в интегральной оптике.

2. Особенности метода ПЛЗ и детали эксперимента

Важной особенностью метода ПЛЗ применительно к стеклам является то, что при использовании импульсов с длительностью пикосекунды и меньше время передачи лазерной энергии электронной подсистеме намного меньше характерных времен релаксации большинства оптических стекол [19,20]. Поэтому, процессы формирования плазмы свободных электронов и переноса энергии обусловлены, в основном, нелинейной фотоионизацией и лавинной ионизацией и слабо зависят от теплопроводных характеристик вещества, которые проявляются на последующих стадиях. Физические механизмы, ответственные за формирование структур усложняются из-за вклада нелинейно-оптических и дисперсионных эффектов в нелинейном распространении ультракоротких импульсов. Несмотря на это, результаты опытов позволяют установить общие закономерности и физически обосновать роль различных технологических параметров в формировании свойств изготавливаемых структур. Так, морфология и тип лазерно-индуцированных следов в веществе зависят от ряда параметров импульсного лазера, включая энергию и длительность импульса, частоту повторения лазера и размер фокусного пятна. Кроме того, время экспозиции образца в наших экспериментах можно варьировать путем изменения скорости перемещения фокальной области в веществе.

Установка лазерной обработки является сочетанием коммерческой станции микрообработки μ FAB от MKS Newport и фемтосекундной лазерной

системы от Amplitude Systemes с регенеративным усилителем чирпированных импульсов на основе Yb:KGW, работающем на длине волны 1030 нм. Структурные изменения в стекле N-BK7 получаются фокусированием лазерного луча внутри образца с толщиной 4 мм, закрепленного на верхнем столике программного управляемого блока. Последний обеспечивает точность позиционирования в 50 нм и перемещение образцов в трех измерениях со скоростью до 5 мм/сек в области $100 \times 100 \times 4$ мм. Траектория столиков и электромеханический затвор управляются синхронно с помощью контроллера XPS-100, который позволяет выбирать режим движения для облучения образца пространственно-селективным образом.

Для фокусировки использовался объектив с числовой апертурой $NA=0.25$ и рабочим расстоянием 10.6 мм. Выбранный объектив обеспечивает оптимальную глубину фокусировки и достаточно большое рабочее расстояние для изготовления структур большой протяженности в исследованной области энергий лазера. Кроме того, умеренная фокусировка позволяет минимизировать влияние сферических aberrаций из-за контраста границы перехода воздух-стекло [21], при этом сохраняя приемлемое разрешение лазерной записи.

Изготовление вписанных структур проводилось в режиме поперечной записи (Рис.1), когда структурирование получается перемещением образца в плоскости, перпендикулярной распространению лазера.

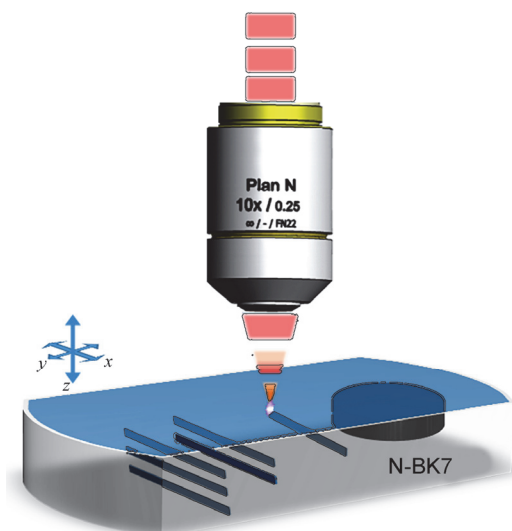


Рис.1. Иллюстрация геометрии поперечной записи.

Изучение режимов обработки для однородного структурирования проводилось в узкой области параметров, представленной в Табл.

Экспериментальные параметры

Параметр	Значение
Длина волны	1030 нм
Энергия импульса	0.8–10 мкДж
Длительность импульса	500 фс
Частота повторения	1 кГц; 5 кГц
Скорость сканирования	200 мкм/с–1000 мкм/с
Глубина фокуса (от поверхности образца)	50 мкм–2000 мкм
Эффективное число импульсов, N_{eff}	3–65

Энергия импульса регулируется с помощью аттенюатора мощности, состоящего из вращающейся полуволновой пластины и тонкопленочного поляризатора. Степень облучения образца (экспозиция) также менялась путем управления скорости трансляции образца при заданной частоте повторения импульсов.

Влияние энергии и скорости сканирования на лазерно-индуцированные треки исследовалось путем записи серии структур простой геометрии (линии, окружности) вблизи полированной грани образца ВК7 (Рис.1), с последующим изучением изображений области взаимодействия, снятых в боковой геометрии на просвечивающем оптическом микроскопе Olympus BX51. Запись структур с перемещением образца в горизонтальной плоскости (например, на расстояние 300 мкм вдоль оси x в данном эксперименте) вместо статического облучения обеспечивает больший контраст модифицированной области на микроскопических изображениях. Кроме того, вариация скорости перемещения образца при записи таких линий позволяет найти оптимальную дозу облучения, соответствующую реальным условиям во время послойного “выращивания” слоев фазового элемента.

Знак и величина (ИПП) определялись двумя способами: а) путем записи и измерения поперечных волноводов (в случае положительного наведенного ИПП волноводные свойства наблюдаются вдоль лазерного трека, а в случае отрицательного – вдоль необработанной области между двумя смежными треками); б) предлагаемым нами же методом, основанным на измерении относительного смещения высоты лазерных треков (т.е. изменения оптической длины пути фокусируемого пучка), полученных в глубине образца после прохождения объемной – с толщиной 1.5 мм и более, фазовой структуры,

изготовленной в данном режиме обработки. Детали метода и результаты будут опубликованы отдельно.¹

3. Результаты и обсуждение

В рамках данной статьи мы будем обсуждать результаты с точки зрения их практического применения для изготовления однородных вписанных структур, оставляя более детальное рассмотрение режимов обработки для последующих публикаций.

Параметром, часто используемым для описания условий облучения в динамическом режиме является энергетическая доза, определяемая как $D = E_p R / AV$ (в единицах мкДж/мкм³), где E_p – энергия импульса, A – площадь фокального пятна, R – частота повторения лазера, а V – скорость сканирования. Эффективное число импульсов, взаимодействующих с единичной площадью, при этом, $N_{\text{eff}} = 2wR/V$, где $2w$ – диаметр сфокусированного пучка, который в наших экспериментах составляет ~2.6 мкм. Уже хорошо установлено [3,4], что при частоте повторения лазера много меньше 1 МГц эффекты, связанные с воздействием череды импульсов на одну и ту же область вещества (т.н. многоимпульсные эффекты, например, накопление тепла при длительной экспозиции) не имеют существенного влияния на механизмы модификации в кварце или боросиликатном стекле. Поэтому, не ожидается значительных морфологических и структурных различий в треках модификации при частотах следования импульсов 1 кГц и 5 кГц при условии, что другие параметры облучения образца, т.е. поток энергии импульса E_p/A и эффективное число импульсов N_{eff} , остаются неизменными в двух случаях. В нашем случае это было подтверждено для ряда выборочных значений N_{eff} , полученных изменением V и R в пределах, приведенных в Табл.

Исходя из вышесказанного, зависимость ИПП от (потока) энергии импульса можно исследовать при фиксированных значениях N_{eff} . Различие частоты повторения R , при этом, приводит лишь к изменению средней мощности излучения, вклад от которой незначительный в модификации стекла, поскольку последняя обусловлена, в основном, нелинейным взаимодействием импульсов с высокой пиковой интенсивностью.

Зависимость индуцированных структур от энергии импульса приведены на Рис.2 для двух значений N_{eff} .

Влияние самофокусировки, плазменной расфокусировки и других нелинейностей на распространение ультракоротких импульсов и морфологию индуцированные треков изучалось в ряде работ [4,13,22]. Критическая мощность, т.е.

¹ См. также сообщения в материалах Int. Workshop «Ultrafast Beams and Applications», 02-05 July, 2020, Yerevan, Armenia. Презентации <http://candle.am/wp-content/uploads/2017/12/M.-Sargsyan.pdf> и http://candle.am/wp-content/uploads/2017/12/A.-Yeremyan_UBA-19_.pdf

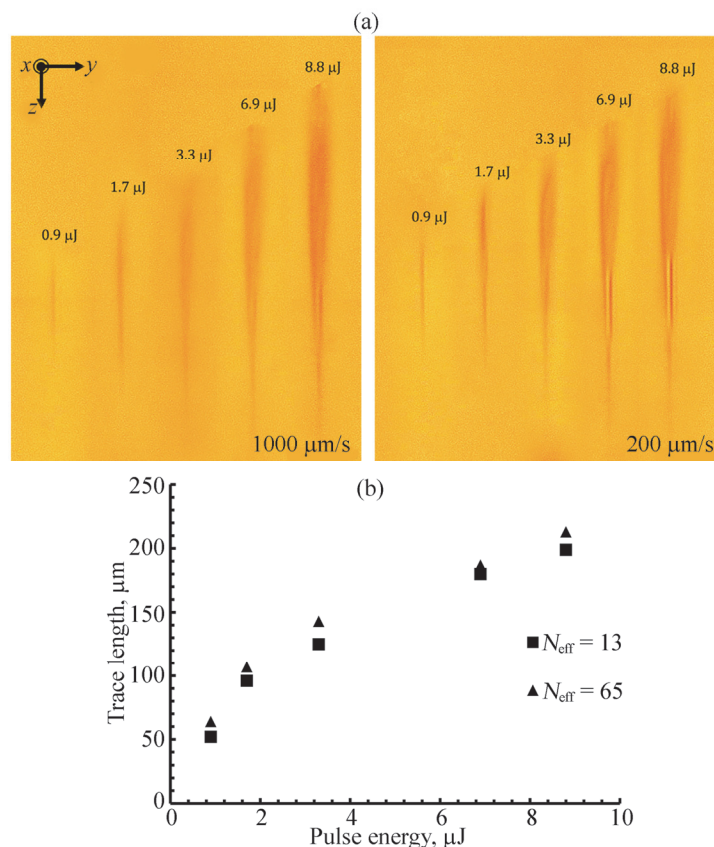


Рис.2. (а) Зависимость формы трека от энергии импульса лазера при частоте повторения лазера 5 кГц и скоростях сканирования 1000 мкм/с ($N_{\text{eff}} = 13$) (слева) и 200 мкм/с ($N_{\text{eff}} = 65$) (справа). (б) Видимая протяженность трека в зависимости от скорости сканирования. Геометрический фокус находится в глубине ~ 530 мкм от поверхности образца. Запись производится перемещением образца вдоль x , перпендикулярно направлению лазера z .

пиковая мощность при которой может наблюдаться самозахват лазерного пучка [23] для стекла ВК7 составляет 3.4–3.6 МВт согласно разным сообщениям (см. [24] и ссылки в ней). Для пучка с гауссовским профилем и длительностью 500 фс, использованном в нашем случае это соответствует энергии импульса $E_{cr} \sim 1.8$ –1.9 мкДж. Эффекты самофокусировки могут наблюдаться выше этого значения.

Показанные на Рис.2а треки соответствуют энергиям как выше, так и ниже критической. Из сравнения изображений видно, что зависимость типа и морфологии треков от энергии имеет особенности при разных скоростях сканирования, что более выражено проявляется при энергиях, близких к критической $E_{cr} = 1.9$ мкДж порога самофокусировки. Так, при облучении с $N_{\text{eff}} = 13$ и энергиях импульса меньше E_{cr} треки имеют форму эллипсоида с оттянутым концом,

типично наблюдаемую при не слишком сильной фокусировке и умеренных энергиях импульса [11,13]. Характерным для данных структур является почти однородная (в пределах разрешения микроскопа) модификация с сохранением типа (знака) ИПП по всей протяженности трека. При энергиях выше E_{cr} наблюдаются структурные нерегулярности, состоящие в деформации формы трека и/или появлении областей с разным знаком ИПП. На микроскопических изображениях это соответствует темным (отрицательное ИПП) и светлым (положительное ИПП) участкам трека. Сложная структура треков при больших пиковых мощностях, как уже отмечалось, обусловлена радикальным изменением формы и динамики распределения энергетического сгустка вследствие включения и сочетания механизмов самофокусировки, каналирования и плазменной дефокусировки.

Ход зависимости от энергии при более длительной экспозиции ($N_{eff} = 65$) аналогичен с той разницей, что структурные отклонения начинаются уже при энергиях импульса ~ 1.7 мкДж, т.е. меньшей, чем критическая энергия (Рис.2а). Такое эффективное «уменьшение» критической энергии с увеличением N_{eff} можно качественно объяснить, если учитывать, что при облучении последовательностью импульсов каждый очередной импульс взаимодействует с областью вещества с уже модифицированным (в рассматриваемом случае – с уменьшенным) показателем преломления. При заданной пиковой мощности наведенная нелинейность больше для более разреженной среды (с меньшим линейным показателем преломления). Соответственно, порог самофокусировки эффективно уменьшается для более поздних импульсов, вклад от которых становится доминирующим в структурировании области взаимодействия с веществом. Сделанное предположение верно до тех пор, пока частота следования импульсов невелика, т.е. время отставания импульсов больше времени тепломеханической релаксации стекла.

Описанным выше механизмом увеличения наведенной нелинейности может объясняться также зависимость протяженности треков от N_{eff} (скорости записи), показанная на Рис.2b. В частности, при малых энергиях импульсов эффективное увеличение наведенной нелинейности при больших N_{eff} приводит к расширению области за перетяжкой фокуса, где преодолевается порог модификации вещества за счет интенсивного многофотонного поглощения. Решающую роль в удлинении структуры с ИПП, при этом, играют также сферические аберрации, неизбежные при большой глубине записи.

Следует отметить, однако, что приведенная картина энергетической зависимости индуцированных треков слишком упрощенная, и для ее подтверждения требуются более детальные исследования.

Полученные выше зависимости от энергетической дозы использовались нами для создания фазовых структур больших размеров методом послойной

записи. Для этого сначала производилась серия структур внутри образца на различных расстояниях от поверхности согласно схеме, иллюстрированной на Рис.3а: при фиксированных условиях записи серия структур записывалась путем трансляции геометрического фокуса вдоль направления лазера (z) с дискретным шагом (Δz). Это позволяет изучить зависимость морфологии лазерного трека от глубины записи, а также найти оптимальное перекрытие следов для послойного изготовления протяженных однородных структур.

Результаты, соответствующие некоторым значениям энергии импульса и скорости записи показаны на Рис.3б (ср. с Рис.2а). Важно заметить, что,

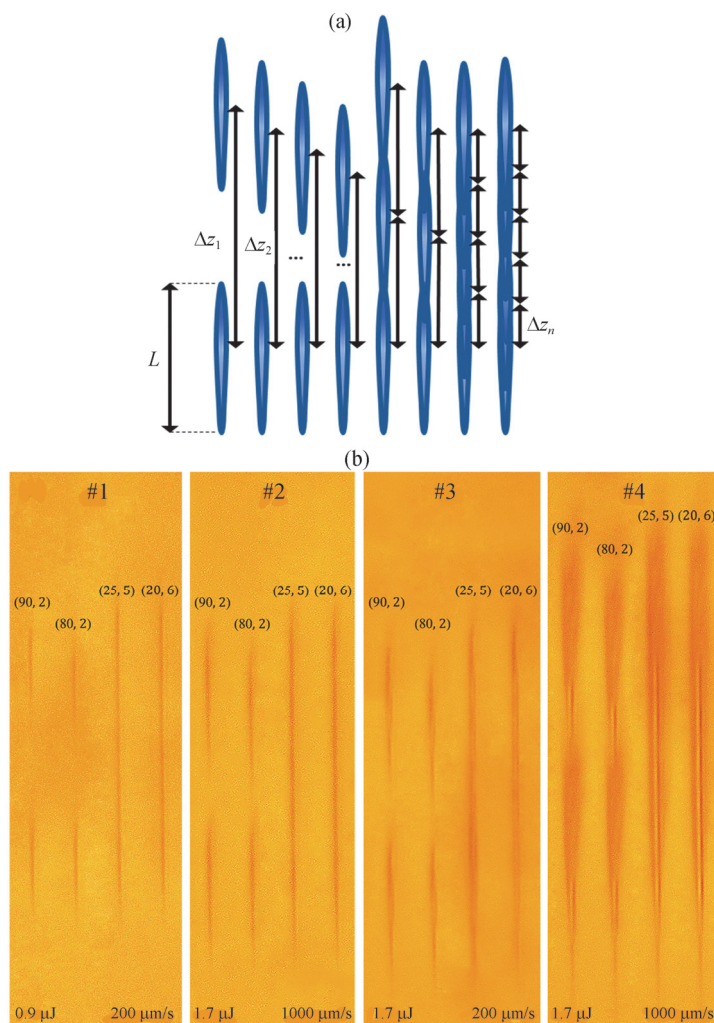


Рис.3. (а) Схема трансляции для получения серии структур (см. основной текст для описания); (б) серии треков, полученных на различной глубине при частоте повторения лазера 5 кГц и разных параметрах записи; пары чисел на рисунке (Δz , N) указывают шаг трансляции (Δz) и количество проходов (N) в соответствующей серии.

благодаря малым линейным потерям в образце и умеренной фокусировке (выбору объектива с средней числовой апертурой), форма и протяженность одиночных треков практически не зависят от глубины записи. В результате, подходящим выбором шага трансляции Δz геометрического фокуса можно получить однородные по типу и сплошности протяженные структуры при энергиях, ниже критической (при достаточно малых энергетических дозах, группы треков #1 и #2 на Рис.3b).

Интересная особенность наблюдается при послойной записи импульсами с большой пиковой мощностью (группы #3 и #4, Рис.3b). Как уже отмечалось, полученные в закритических режимах структуры характеризуются появлением зон с положительным и отрицательным ИПП, при этом, «хвостовая» часть трека представляет разреженную область с уширенным поперечным сечением (см. Рис.2а и Рис.3b). Как видно из Рис.3b #4, при послойной записи с достаточно малым шагом трансляции данный участок «стирается» и «перезаписывается» высокоэнергетической частью фокального пятна последующих импульсов, приводя к формированию области с ИПП переменного знака. Аналогичное явление ранее наблюдалось в кварцевом стекле, а также в ВК7 при продольной геометрии записи, т.е. при непрерывном сканировании вдоль направления лазера [13], с использованием большей частоты следования импульсов (100 кГц) и меньшей длительности импульса (120 фс). Хотя авторы [13] объясняют данное наблюдение вкладом аккумуляционных эффектов и фазовым переходом через точку размягчения стекла, наблюдение нами того же эффекта при гораздо меньшей частоте следования, а также ожидаемое доминирование теплового расширения в механизмах релаксации в ВК7 оставляют вопрос открытым и требующим дальнейшего изучения.

Структуры с модулированным знаком ИПП типа показанных на Рис.3b #4 представляют практический интерес с точки зрения создания вписанных вертикальных волноводов, хотя потери в таких волноводах ожидаются слишком большими из-за значительной неоднородности сечения.

С другой стороны, режимы обработки с малыми дозами облучения могут быть использованы для создания объемных фазовых структур с однородным ИПП. В частности, в режимах, соответствующих Рис.3b #2 нами была записана структура в форме параллелепипеда с большими размерами. Набор толщины структуры в поперечных направлениях производился повторением записи протяженной однородной структуры #2 Рис.3b вдоль оси y (см. Рис.1 и Рис.2). Для достижения необходимого перекрытия между соседними слоями мы воспользовались имеющейся экспериментальной возможностью сверхпрецизионного позиционирования образца, позволяющего сверхточное (с точностью 50 нм) перемещение образца с шагом меньшим, чем радиус фокального пятна.

Вертикальное и боковое изображения приграничных параллелепипеду участков (Рис.4) показывают высокую (в пределах разрешения микроскопа) однородность модифицированной области.

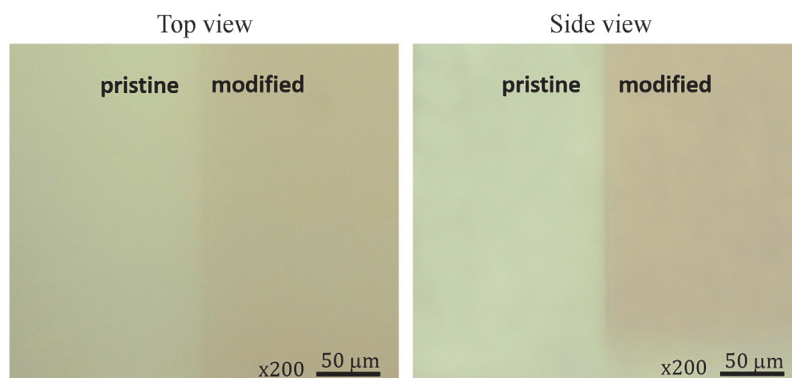


Рис.4. Вертикальное (слева) и боковое (справа) изображения приграничной области параллелепипеда с объемом $600 \times 600 \times 1600$ мкм³, вписанного внутри образца ВК7 с толщиной 4 мм.

Недостатком описанного метода получения больших фазовых структур является относительно большое время изготовления, обусловленное необходимостью записи большого количества слоев. Одним из прямых способов ускорения процесса, поэтому, было бы использование объектива с меньшей числовой апертурой, позволяющего получить более длинные треки с одного прохода лазера, как это продемонстрировано в [25]. Однако, для преодоления порога модификации в таком случае требуются весьма большие энергии импульса, что, в свою очередь, приводит к описанному выше включению керровских нелинейностей уже вблизи порога модификации, и процесс записи становится менее детерминистичным. Кроме того, слабая фокусировка приводит к уменьшению разрешения, что может иметь критическое значение в тех интегрально-оптических применениях, где нужно сочетание больших фазовых объемов с тонкими особенностями структуры. С учетом последнего обстоятельства, описанный в настоящей работе подход имеет определенные преимущества.

4. Заключение

В данной работе продемонстрирована возможность создания однородных фазовых структур большого размера, вписанных в объем стекла N-BK7 путем высокоточного сканирования лазером с фемтосекундной длительностью импульсов. На основе микроскопических исследований показано, что, при малых энергетических дозах облучения модификация вещества приводит к сплошному (отрицательному) изменению показателя преломления, в то время, как при

больших пиковых мощностях и/или длительной экспозиции лазерно-индуцируемые треки имеют неоднородную форму с переменным знаком изменения показателя преломления. Обсуждена роль различных параметров в формировании структур, установлены режимы микрообработки, позволяющие получить протяженные однородные структуры путем послойной записи, поперечным сканированием сфокусированного лазерного луча. Обсуждены перспективы интегрально-оптических применений результатов, а состоятельность предложенного подхода продемонстрирована изготовлением заглубленной, однородной фазовой структуры больших размеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **F. Sima, et al.** Nanophotonics, **7(3)**, 613 (2018).
2. **J. J. Choi and C. Schwarz.** Int. J. Appl. Glass Sci., **11**, 480 (2020).
3. **R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi.** Femtosecond laser micromachining: photonic and microfluidic devices in transparent materials (Topics in Applied Physics), Springer, 2012.
4. **A. Vainos.** Laser growth and processing of photonic devices, Woodhead Publishing Ltd., 2012.
5. **R.R. Gattas, E. Mazur.** Nat. Photon., **2**, 219, (2008).
6. **G.Y. Chen, et al.** Sci. Rep., **8**, 1 (2018).
7. **M.K. Bhuyan, et al.** Optica, **4**, 951 (2017).
8. **A. Cerkauskaite, et al.** Opt. Express, **25(7)**, 8011 (2017).
9. **C. Hnatovsky, et al.** Appl. Phys. Lett., **87**, 014104 (2005).
10. **V. Garzillo, et al.** J. Appl. Phys., **120**, 013102 (2016).
11. **K. Mishchik, et al.** Opt. Mat. Express, **3**, 67 (2013).
12. **T. Allsop et al.** Appl. Opt., **49**, 1938 (2010).
13. **A. Mermillod-Blondin, et al.** Phys. Rev. B, **77**, 104205 (2008).
14. **V.R. Bhardwaj, et al.** J. Appl. Phys., **97**, 083102 (2005).
15. **J. Lapointe, R. Kashyap.** Sci. Rep., **7**, article num. 499 (2017).
16. **M. Duocastella, C.B. Arnold.** Laser Photon. Rev., **6**, 607 (2012).
17. **G. Račiukaitis, et al.** J. Laser Micro/Nanoengineering, **6(1)**, 37 (2011).
18. **M. Ams, et al.** Opt. Express, **13(15)**, 5676 (2005).
19. **C. Mauchair, et al.** High Power Laser Science and Engineering, **4**, e46 (2016).
20. **J. Bonse, et al.** Applied Physics A, **124**, article num. 60 (2018).
21. **A. Marcinkevičius, et al.** Appl. Phys. A, **76**, 257 (2003).
22. **K. Yamada, et al.** Opt. Lett., **26(1)**, 19 (2001).
23. **J.H. Marburger.** Prog. Quant. Electron., **4**, 35 (1975).
24. **M.J. Weber.** Handbook of optical materials, CRC press, 2003.
25. **M. Kamata, M. Obara.** Appl. Phys. A, **78**, 85 (2004).

N-BK7 ԱՊԱԿՈՒ ԾԱՎԱԼՈՒՄ ՀԱՄԱՍԵՌ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ
ՊԱՏՏԱՍՏՈՒՄԸ ԳԵՐԿԱՐՃ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ԻՄՊՈՒԼՍՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՄԲ

Ա.Ս. ԵՐԵՄՅԱՆ, Մ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Պ. Կ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Հետազոտվում է N-BK7 բորոսիլիկատային ապակու ծավալում մեծ չափսերով համասեռ փուլային կառուցվածքների ստեղծման նպատակով լազերային ուղղակի գրանցման մեթոդի կիրառման հնարավորությունը: Ուսումնասիրված է սուբփիկովայրկյանային (500 ֆվ) իմպուլսների ազդեցությամբ ապակու ներսում մակածված վերափոխությունների մորֆոլոգիայի և տիպի կախվածությունը ճառագայթահարման էներգիական չափաբաժնից: Ցույց է տրված, որ չափավոր ֆոկուսավորման և իմպուլսի՝ ինքնաֆոկուսացման երևույթների շեմը չգերազանցող էներգիաների դեպքում հնարավոր է ընտրել գրանցման ռեժիմներ (սկանավորման արագություն, իմպուլսների հերթագայման հաճախություն), որոնք թույլ են տալիս շերտա-շերտ սկանավորման եղանակով պատրաստել ապակու բեկման ցուցչի հոծ ձևափոխմամբ տարածական կառուցվածքներ: Լազերի մեծ պիկային հզորությունների դեպքում Կեռի տիպի ոչ գծայնություններն ազդում են իմպուլսի տարածման և պլազմայի զենեքեցման ու ռելաքսացիայի գործընթացների դինամիկայի վրա, իսկ ձևավորվող կառուցվածքներն էապես անհամասեռ են՝ բեկման ցուցչի փոփոխության փոփոխական նշանով: Մոտեցման կիրառելիությունը հաստատելու նպատակով պատրաստվել է մեծ չափսեր ունեցող ընկղմված փուլային կառուցվածք, որը մշակման ամբողջ տիրույթում ցուցաբերում է բեկման ցուցչի բավականին համասեռ փոփոխություն:

FABRICATION OF UNIFORM PHASE STRUCTURES IN THE BULK
OF AN N-BK7 GLASS USING ULTRASHORT LASER PULSES

A.S. YEREMYAN, M.L. SARGSYAN, P.K. GASPARYAN

We study the possibility of application of direct laser writing technique for fabrication of large-size uniform phase structures in the bulk of a borosilicate glass N-BK7. The morphology and the type of modifications induced by sub-picosecond (500 fs) pulses is studied depending on the energy dose of irradiation. We show that, with moderate focusing and at pulse energies below the threshold of self-focusing effects, it is possible to choose writing regimes (scanning speed, pulse repetition rate) which allow the fabrication of extended structures with flat modification of the glass refractive index in layer-by-layer scanning mode. At higher peak intensities of the laser, Kerr nonlinearities affect the pulse propagation and the dynamics of the relaxation processes, and the resulting structures are essentially inhomogeneous with alternating sign of refractive index change. In order to validate the approach, a buried phase structure with large dimensions was fabricated showing a rather uniform refractive index change over the entire processed range.