

Пластическая деформация - природа прямой фемтосекундной лазерной записи волноводов в кристаллах YAG

С.С. Федотов¹, Л.Н. Бутвина², А.Г. Охримчук^{1,2,*}

¹Российский Химико-Технологический Университет им. Д.И. Менделеева

²Институт Общей Физики РАН им. А.М. Прохорова, ИЦВО им. Е.М. Дианова.

*E-mail: okhrim@fo.gpi.ru

DOI: 10.31868/RFL2020.32-33

Прямая лазерная запись (direct laser writing) в объёме различных оптических сред зарекомендовала себя как гибкая и эффективная технология формирования волноводов и волноводных цепей в трёх-мерном формате. Этот метод позволяет структурировать показатель преломления среды с микронным и субмикронным разрешением. Механизм и природа изменения показателя преломления в стёклах и полимерах в основном понятны. Напротив, природа изменения показателя преломления в кристаллах при записи волноводов с низкими потерями не раскрыта. Понятны лишь механизмы изменения показателя преломления при экстремальном воздействии ультракоротких лазерных импульсов на монокристалл – при формировании полостей и фазовой трансформации [1,2]. Но такие режимы не годятся для записи волноводов с низкими потерями. Между тем важно знать состояние вещества и механизмы, приводящие к умеренной модификации сверхкороткими импульсами, поскольку такое знание позволило бы улучшить однородность записываемых треков изменённого показателя преломления, составляющих волноводов, и, как следствие, уменьшить волноводные потери.

Предмет данных исследований – продольная однородность треков, записанных пучком фемтосекундного лазера, сфокусированным объективом с $NA=0.65$ в кристалле YAG:Nd и кварцевом стекле, и статистика энергии лазерных импульсов, прошедших через образцы во время этой записи. Обнаруженные закономерности в измеренных зависимостях позволили нам сделать выводы о природе модификации для широких диапазонов скоростей сканирования образца относительно перетяжки лазерного пучка, и энергий лазерных импульсов, в том числе при небольшом превышении порога модификации, то есть при энергии записи волноводов с низкими потерями.

Измерения относительного стандартного отклонения нелинейного пропускания лазерных импульсов (ОСОП) и продольной неоднородности треков мы представили в зависимости от перекрытия импульсов $P=D/(f*V)$ (Рис.1), где D – диаметр перетяжки лазерного пучка, f – частота повторения импульсов, V – скорость сканирования образца относительно перетяжки (сканирование перпендикулярно пучку). Продольная неоднородность трека R в кристалле YAG:Nd была получена с помощью анализа Фурье фазового изображения области кристалла, содержащей трек. Фазовое изображение получено с помощью количественной фазовой микроскопии (QPM). Во всех экспериментальных зависимостях для кристалла наблюдается ступенька в области перекрытий $P=11-15$, и монотонное дальнейшее увеличение ОСОП и неоднородности R . Для кварцевого стекла ступенек не наблюдается. Более того, зарегистрировано небольшое уменьшение измеряемых параметров при перекрытии более 15.

Мы считаем, что модификация кристалла под воздействием жёстко сфокусированных сверхкоротких импульсов - есть пластическая деформация в микрообъёме. Пластическая деформация сопровождается генерацией вакансий, их объединением в вакансионные диски, и наконец, рождением из них дислокаций. Уменьшение показателя преломления – результат уменьшения плотности кристалла при пластическом растяжении под воздействием давления, создающегося в области электронной лазерной плазмы. Уменьшение плотности обусловлено появлением вакансионных дисков и агломерацией дислокаций. Во время прямой лазерной записи мы различили три режима пластической деформации, которые характерны и для традиционной деформации при механическом нагружении макро- образцов. *Первый режим* ($P < 9$) - генерация дислокаций скольжения, *второй* ($P > 15$) – упрочнение, при котором генерируются дислокации различных систем скольжения, и как следствие они препятствуют скольжению друг другу, *третий режим* ($P = 9-15$) – промежуточный, в котором происходит самоорганизация в системе дислокация, проявляющаяся в периодической модуляции показателя преломления с шагом в 1,2 мкм [3]. Режим пластической деформации однозначно определяется двумя параметрами – энергией импульса и перекрытием P .

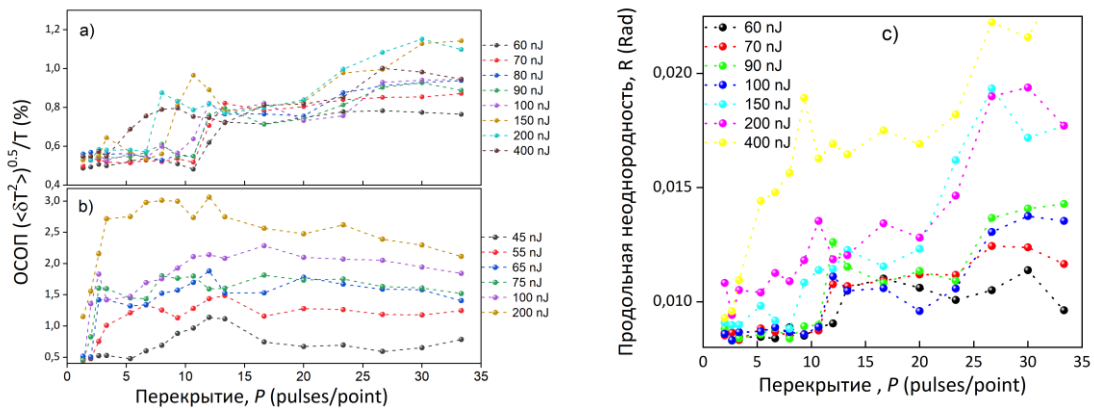


Рис.1. Зависимости ОСОП (a,b) и неоднородности треков для кристалла (a) кварцевого стекла (b).

Мы полагаем, что ступенька в зависимостях ОСОП и продольной неоднородности от перекрытия связана со сменой режима пластической деформации – от лёгкого скольжения дислокаций к упрочнению. Качественное различие измеренных зависимостей для кристалла и стекла мы объясняем фундаментально различной природой пластической деформации в кристаллах и стёклах. В кристаллах - это генерация и скольжение дислокаций, которые создают дальнедействующие поля напряжений, приводящие к взаимодействию и торможению движения дислокаций. В стёклах возможна перестройка только ближнего порядка, поэтому упрочнение не наблюдается.

Для записи волноводов с малыми потерями, следует обеспечить режим лёгкого скольжения дислокаций, то есть перекрытие импульсов в диапазоне 3-7. Мы ожидаем, что предложенная модель применима и к другим кристаллам, и открывает новый подход к исследованию природы прямой лазерной записи.

Исследования поддержаны РФФ, грант #18-19-00733.

Литература

- [1] E. G. Gamaly, S. Juodkazis, et al., *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* **73**, 1–15 (2006).
- [2] A.G. Okhrimchuk, A.S. Lipatiev, E.V. Zharikov et al., *Opt. Mater. Express* **7**, 3408 (2017).
- [3] D. Kuhlmann-Wilsdorf, *Mater. Sci. Engineering A* **113**, 1–41 (1989).