

06:09

Фемтосекундная лазерная запись волноводных микроструктур в пленках $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ и их характеристика нелинейно-оптическим методом

© А.С. Елшин, Е.Д. Мишина

Московский технологический университет, Москва, Россия
E-mail: Elshin_andrew@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 марта 2018 г.

Рассмотрена фемтосекундная лазерная запись сегнетоэлектрических 1D-структур, имеющих волноводные и нелинейно-оптические свойства. Показано прохождение луча по полученным волноводным структурам. Оптимальная скорость и плотность мощности записи составили $50\text{--}500\ \mu\text{m/s}$ и $1\text{--}1.5\ \text{MW/cm}^2$ соответственно. Предложена двухстадийная методика записи, благодаря которой можно улучшить нелинейно-оптические свойства структур.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.12.46294.17299

Современная отрасль телекоммуникаций использует оптические технологии для передачи, модуляции, фильтрации, усиления оптических сигналов. Тенденцией этой отрасли является интеграция мультифункциональных устройств в максимально компактном виде. Развитие лазерных технологий позволяет создать волноводные устройства в диэлектрических материалах путем лазерного отжига (лазерной записи). Эта методика является привлекательной для создания фотонных интегральных схем. Подобная методика с использованием фемтосекундного лазерного источника в видимом диапазоне была впервые описана более 20 лет назад [1]. До этого использовалось в основном ультрафиолетовое излучение из-за высокой энергии фотонов. Основным преимуществом использования фемтосекундного лазера является нелинейный характер мультифотонного поглощения [2], благодаря чему возможно получение наноструктур с размерами в десятки нанометров [3]. В последние годы были получены интересные результаты. Так, была показана возможность создания с помощью лазерного отжига

волоконного лазера [4], оптического волноводного делителя [5]. С помощью автоматизированных подвижек, перемещающих образец во время отжига, можно получать структуры со сложной 3D-геометрией [6]. Для активных оптических элементов, таких как оптические конверторы частот, необходимы материалы, обладающие нелинейно-оптическими свойствами [5]. Поэтому нелинейно-оптическая диагностика является одной из ключевых методик подобных исследований [7].

В эксперименте использовались пленки цирконата-титаната свинца (PZT) состава $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3 + 10\% \text{PbO}$. Толщина пленки $1 \mu\text{m}$ [8]. Пленки PZT наносились с помощью высокочастотного магнетронного распыления на платинизированную кремниевую подложку $\text{Pt}(80 \text{ nm})/\text{SiO}_2(300 \text{ nm})/\text{Si}(300 \mu\text{m})$. Изотермического отжига не проводилось, поэтому пленки имели квазиаморфную структуру без сегнетоэлектрических свойств.

В качестве источника лазерного излучения был использован фемтосекундный лазер (Ti: sapphire, „Авеста-Проект“, Россия) с длиной волны 800 nm , длительностью импульсов 100 fs , частотой повторения 100 MHz . Для фокусировки лазерного излучения на образце использован конфокальный микроскоп Alpha 300 (WITec) с объективом LD EC Epiplan-Neofluar 100X/0.75.

При перемещении лазерного луча относительно образца можно получить протяженные сегнетоэлектрические структуры. Благодаря тому что показатель преломления сегнетофазы выше, чем для окружающего прекурсора, такие структуры имеют волноводные свойства, т.е. по ним можно передавать свет. Кроме того, структуры имеют нелинейно-оптические свойства, и их можно использовать в качестве активных оптических элементов.

Скорость прохода отжигающего луча регулируется с помощью автоматизированной подвижки. Для достижения оптимальных результатов были использованы ранее полученные данные об оптимальном времени отжига локальных структур [9]. При ширине луча $1 \mu\text{m}$ время нагрева локальной структуры 0.1 s соответствует скорости отжига протяженной структуры $10 \mu\text{m/s}$. Были получены структуры при скорости $10-5000 \mu\text{m/s}$ и плотности мощности $1-2 \text{ MW/cm}^2$. Ширина структур возрастает с ростом плотности мощности от 0.4 до $1.2 \mu\text{m}$. При одинаковом времени воздействия условия кристаллизации локальных и протяженных структур схожи. При скоростях прохода луча порядка

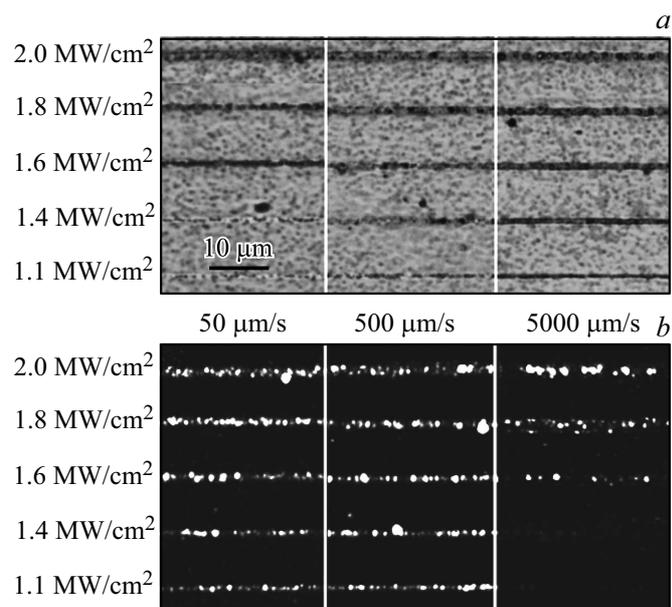


Рис. 1. Оптическое изображение волноводных структур при различной плотности мощности и скорости движения луча, *b* — нелинейно-оптическое изображение (вторая гармоника) тех же областей.

скорости волны кристаллизации ($0.5\text{--}1\text{ cm/s}$) [10], а также при высокой плотности мощности структуры получаются сильно неоднородными.

На рис. 1 приведены оптические и нелинейно-оптические (вторая гармоника на длине волны 400 nm) изображения протяженных сегнетоэлектрических структур. Отжиг проводился с плотностью мощности в диапазоне от 1 до 2 MW/cm^2 и скоростью прохода луча от 50 до $5000\text{ }\mu\text{m/s}$. По нелинейно-оптическим изображениям видно, что при скорости прохода $5000\text{ }\mu\text{m/s}$ структуры становятся сильно неоднородными. Отжиг при скоростях 50 и $500\text{ }\mu\text{m/s}$ дал примерно одинаковый результат. При высоких плотностях мощности ($1.8\text{--}2\text{ MW/cm}^2$) ширина и неоднородность структур увеличиваются. Оптимальные плотности мощности составляют $1\text{--}1.5\text{ MW/cm}^2$.

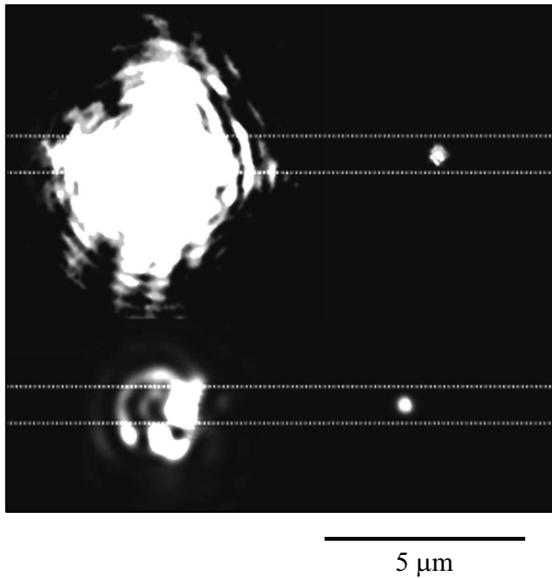


Рис. 2. Оптическое изображение двух отраженных от поверхности основных лучей (слева) и вторичных лучей (справа), вышедших из волноводов. Пунктирные линии обозначают волновод. Верхнее и нижнее изображения соответствуют двум найденным местам (две волноводные структуры) с выходом излучения.

Для проверки волноводных свойств в структуры было заведено лазерное излучение. Использовался простой способ заведения излучения: луч падал на планарную структуру под прямым углом, и с помощью перемещения луча вдоль структуры искалось дефектное место, попадая на которое, излучение могло проникнуть внутрь волновода. Выход излучения из волновода в этом экспресс-способе осуществлялся также за счет возможных дефектов, т.е. на некотором расстоянии от входа наблюдался выходной луч (рис. 2). Изображение получено при высокой чувствительности камеры, поэтому мощный входной луч имеет засветку и большие размеры. Следует отметить, что таких дефектных мест было обнаружено немного, а тот факт, что выход излучения наблюдался локально, а не на

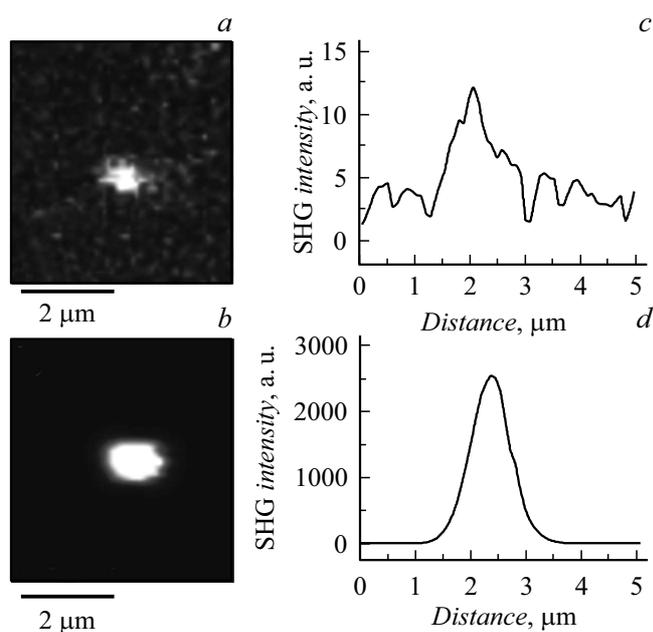


Рис. 3. Нелинейно-оптические изображения (вторая гармоника). *a* — локально отожженная область при плотности мощности 1.8 MW/cm^2 и длительности 0.1 s , *b* — та же область после дополнительного отжига при плотности мощности 0.2 MW/cm^2 в течение минуты, *c, d* — соответствующие сечения изображений.

всем протяжении волноводов свидетельствует о том, что в целом волноводы проводят свет без существенного рассеяния во внешнюю среду. Расстояние от входа до выхода луча составило около $7 \mu\text{m}$.

Существует возможность уменьшить мощность основного этапа отжига, если ввести дополнительный этап медленного отжига, что позволяет снизить температуру и уменьшить возможные повреждения пленки. Это можно делать как с локальными, так и с протяженными структурами. Для медленного отжига достаточно малой плотности мощности (около 0.2 MW/cm^2). Время воздействия было увеличено до 1 min . При этом генерация второй оптической гармоники для

областей с дополнительным отжигом возрастает на два порядка (рис. 3), что указывает на докристаллизацию перовскитной структуры. Этап дополнительного медленного отжига давал результат только после основного этапа быстрого отжига с достаточной плотностью мощности. Без основного этапа кристаллизация при малой плотности мощности не происходила. После дополнительного отжига ширина локальных структур возрастает на 20–60%.

В результате проведенных исследований показана возможность получения сегнетоэлектрических 1D-структур, имеющих волноводные и нелинейно-оптические свойства, с помощью методики фемтосекундной лазерной записи. Нелинейно-оптические свойства таких структур исследовались методом оптической микроскопии второй гармоники. Оптимальная скорость прохода луча составляет 50–500 $\mu\text{m/s}$. Диапазон оптимальной плотности мощности 1–1.5 MW/cm^2 . Представлено прохождение света по волноводным структурам. Показано, что дополнительный этап медленного отжига с меньшей плотностью мощности и большей длительностью может на порядок увеличить нелинейно-оптический отклик микроструктур.

Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки РФ (госзадания вузу 3.1923.2017/4.6 (А.С. Елшин) и 16.4699.2017/6.7 (Е.Д. Мишина)).

Список литературы

- [1] Davis K.M., Miura K., Sugimoto N., Hirao K. // Opt. Lett. 1996. V. 21. N 21. P. 1729–1731.
- [2] Sun H.B., Kawata S. // Adv. Polym. Sci. 2004. V. 170. P. 169–273.
- [3] Tanaka T., Sun H.B., Kawata S. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. N 2. P. 312–314.
- [4] Della Valle G., Taccheo S., Osellame R., Festa A., Cerullo G., Laporta P. // Opt. Express. 2007. V. 15. N 6. P. 3190–3194.
- [5] Stone A., Jain H., Dierolf V., Sakakura M., Shimotsuma Y., Miura K., Hirao K., Lapointe J., Ksashyap R. // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 10391.
- [6] Dai Y., Zhu B., Qiu J., Ma H., Lu B., Cao S., Yu B. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. N 18. P. 181109.
- [7] Cao J., Poumellec B., Brisset F., Helbert A., Lancry M. // J. Opt. Soc. Am. B. 2016. V. 33. N 4. P. 741–747.

- [8] *Пронин И.П., Каптелов Е.Ю., Сенкевич С.В., Климов В.А., Зайцева Н.В., Шаплыгина Т.А., Пронин В.П., Кукушкин С.А.* // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 1. С. 124–128.
- [9] *Елшин А.С., Фирсова Н.Ю., Мишина Е.Д., Абдуллаев Д.А., Киселёв Д.А.* // Рос. технол. журн. 2014. № 3(4). С. 230–241.
- [10] *Elshin A.S., Pronin I.P., Zhigalina O.M.* // Solid State Commun. 2015. V. 224. P. 5–9.