

05

## Прямая фемтосекундная лазерная запись двулучепреломляющих структур с высоким пропусканием в плавленом кварце

© Н.И. Буслеев<sup>1¶</sup>, А.Е. Рупасов<sup>1,2</sup>, В.В. Кесаев<sup>1,2</sup>, Н.А. Смирнов<sup>1,2</sup>, С.И. Кудряшов<sup>1</sup>, Р.А. Заколдаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева,  
119991 Москва, Россия

<sup>2</sup> Университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия

¶e-mail: busleeni@lebedev.ru

Поступила в редакцию 08.11.2022 г.

В окончательной редакции 29.12.2022 г.

Принята к публикации 28.01.2023 г.

Проведено исследование процесса записи двулучепреломляющих структур в объеме плавленого кварца сфокусированными ультракороткими лазерными импульсами с длиной волны 515 nm и различными значениями энергии и длительности импульса, частоты повторений, числовой апертуры и скорости перемещения моторизированной платформы. Было измерено значение фазового сдвига полученных структур, а также исследовано влияние последующего отжига на свойства двулучепреломляющих структур. Показано, что комбинация записи слоистых структур с последующим отжигом позволяет получить структуры высокой степени однородности, обладающие необходимым значением фазового сдвига и высоким пропусканием.

**Ключевые слова:** прямая лазерная запись, фемтосекундные лазерные импульсы, двулучепреломление, отжиг.

DOI: 10.21883/OS.2023.02.54999.3-23

### Введение

В настоящее время фемтосекундные лазеры являются распространенным инструментом для модификации оптических свойств и структурирования прозрачных диэлектриков в объеме, включая стекла [1–3], сапфир [4–6], флюорит [7,8]. В зависимости от параметров используемого лазерного излучения в стеклах могут возникать различные типы модификаций: увеличение показателя преломления в результате уплотнения [3], возникновение самоорганизующихся нанорешеток и нанопор [1,2,9,10], а также образование пустот [3,11,12]. Нанорешетки и нанопоры позволяют создавать в объеме плавленого кварца области, обладающие двулучепреломлением. При этом величина двулучепреломления может управляться режимом записи создаваемых модификаций, например, с помощью изменения толщины слоя структур. В плавленом кварце отдельные элементы нанорешеток представляют собой пористые области, образующиеся в результате быстрой декомпозиции стекла под действием сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов. Пустоты в данных областях возникают в результате образования молекул кислорода, являющихся продуктом распада плавленого кварца [13], и значительно понижают показатель преломления стекла по сравнению с необработанным объемом.

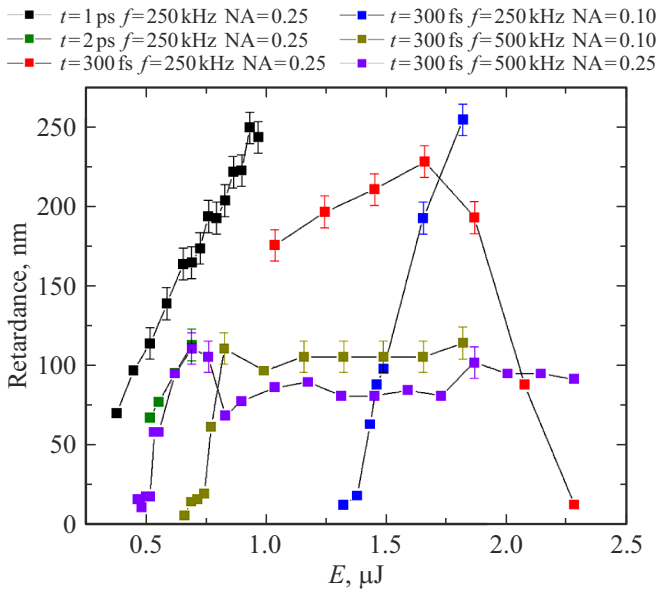
С помощью контроля ориентации записываемых структур [14], направление которых перпендикулярно поляризации используемого при записи лазерного излучения, возможно создание разнообразных оптических элементов [1,6,15,16]. Как материал плавленый кварц

представляет интерес для различных прикладных задач из-за широкого диапазона пропускания, высокого порога оптического пробоя и умеренной дисперсии показателя преломления. Однако создаваемые структуры не всегда обладают высоким пропусканием, необходимым для прикладных задач. Это может быть связано с флуктуацией периодичности записываемых структур и может быть исправлено увеличением числа импульсов в точку в процессе записи структур при более низкой скорости сканирования или перемещения образца, что приведет к образованию более однородных структур [16]. Также потери пропускания можно уменьшить с помощью уменьшения размера элементов записываемых структур.

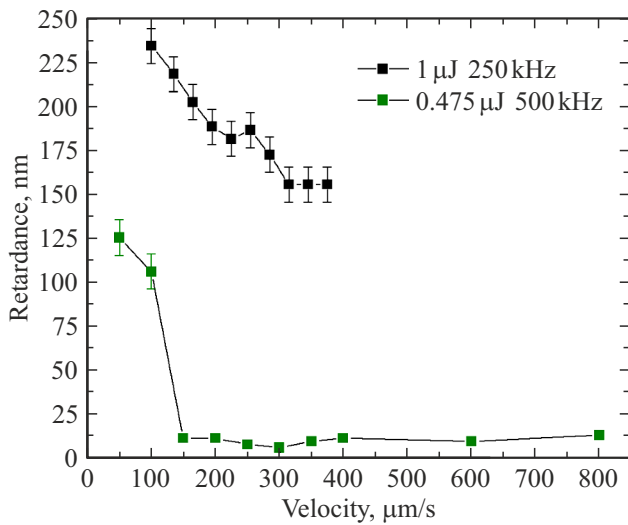
Целью данной работы являлось создание в плавленом кварце однородных двулучепреломляющих структур, которые обладали бы небольшим значением фазового сдвига и высоким пропусканием.

### Экспериментальная часть

В качестве источника лазерного излучения был использован волоконный лазер Satsuma (Amplitude Systèmes) с активной средой на ионах  $\text{Yb}^{+3}$  с длиной волны 515 nm и линейной поляризацией излучения на выходе. Длительность импульсов, регулируемая с помощью встроенного компрессора, составляла 300 fs, 1 и 2 ps, а частота повторений — 250 и 500 kHz. Образец плавленого кварца был закреплен на трехкоординатной моторизированной платформе Prior H1P4A, позволяющей производить запись слоев структур на скорости



**Рис. 1.** Зависимость фазового сдвига отдельных квадратов от энергии импульса для различных параметров записи (длительность импульса, частота повторений, числовая апертура). Скорость перемещения моторизированной платформы  $375 \mu\text{m/s}$ . При значении фазового сдвига менее  $100 \text{ nm}$  погрешность измерения составляет  $\pm 1 \text{ nm}$  (на рисунке не указана).



**Рис. 2.** Зависимость фазового сдвига отдельных квадратов от скорости перемещения моторизированной платформы для различных параметров записи (энергия импульса, частота повторений). Длительность импульса  $300 \text{ fs}$ ,  $\text{NA} = 0.25$ . При значении фазового сдвига менее  $100 \text{ nm}$  погрешность измерения составляет  $\pm 1 \text{ nm}$  (на рисунке не указана).

до  $375 \mu\text{m/s}$ . Для фокусировки были использованы микрообъективы с числовой апертурой  $\text{NA} = 0.1$  и  $0.25$ .

Для определения зависимости характеристик структур от параметров лазерной записи, таких как энергия и длительность импульса, частота повторений и скорость перемещения моторизированной платформы, были со-

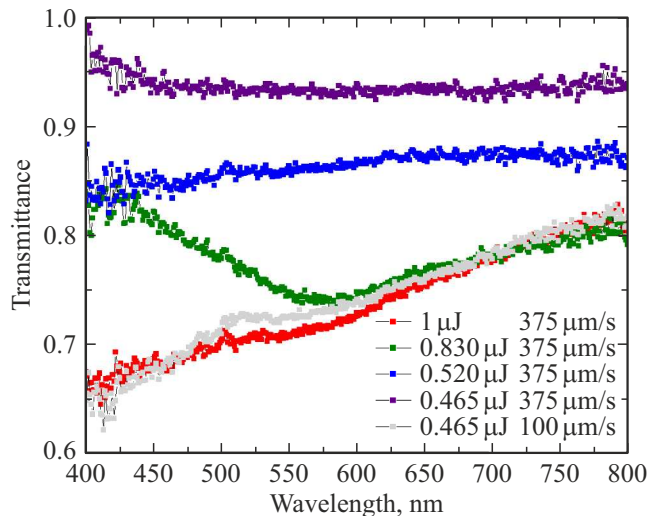
зданы массивы однослойных структур в виде квадратов со стороной  $1000$  и  $500 \mu\text{m}$ . Графики зависимости фазового сдвига и пропускания отдельных структур от параметров записи представлены на рис. 1–3.

После анализа полученных структур и выбора оптимального режима записи были записаны многослойные структуры. Первая область сверху на рис. 4 состоит из 12 слоев двулучепреломляющих структур, записанных с энергией импульса  $0.5 \mu\text{J}$ , длительностью  $300 \text{ fs}$ , частотой повторений  $500 \text{ kHz}$ ,  $\text{NA} = 0.25$  и скоростью записи  $375 \mu\text{m/s}$ . Расстояние между слоями составило  $100 \mu\text{m}$ . Следующий квадрат также состоит из 12 слоев, значение энергии импульса —  $0.475 \mu\text{J}$ . Последующие квадраты были записаны с меньшим числом слоев, в результате чего не удалось получить однородные итоговые структуры. После этого образец был помещен в печь с ПИД-регулятором температуры для отжига при следующих параметрах: начальная температура равнялась комнатной, нагрев проводился со скоростью  $\sim 16.7^\circ\text{C/min}$  до температуры  $1000^\circ\text{C}$ . После отжига при заданной температуре в течение 2 и 8 h образец постепенно охлаждался до комнатной температуры в течение 12 h.

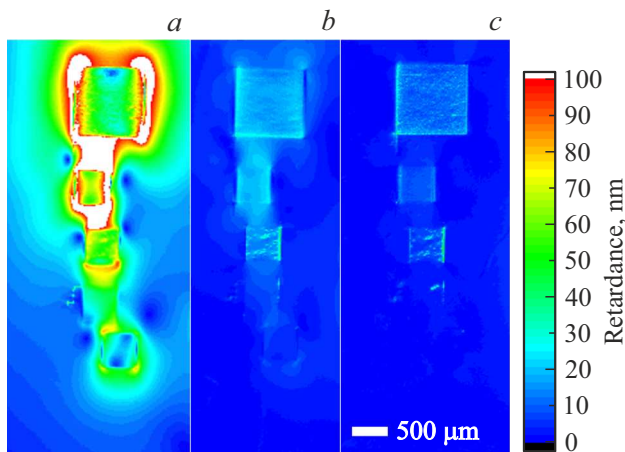
Энергия лазерного излучения измерялась с помощью измерителя энергии Ophir 3A-P. Фазовый сдвиг измерялся системой визуализации двулучепреломления LCC7201 (Thorlabs). Пропускание каждой отдельной структуры измерялось с помощью микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К (ЛОМО).

### Результаты и их обсуждение

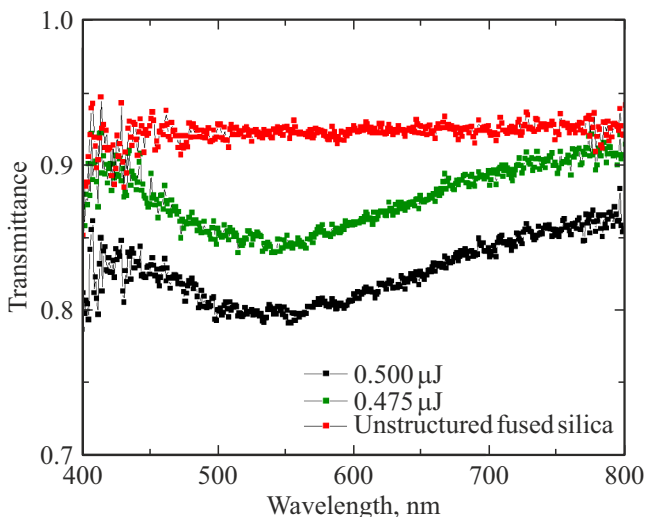
Анализ полученных структур показал, что те структуры, которые записывались при высокой частоте повторений, получились более однородными. Однако даже в



**Рис. 3.** Зависимость пропускания отдельных квадратов от длины волны для различных значений энергии импульса и скорости перемещения подвижной платформы. Длительность импульса  $300 \text{ fs}$ , частота повторений  $500 \text{ kHz}$ ,  $\text{NA} = 0.25$ .



**Рис. 4.** Записанные в объеме плавленого кварца многослойные структуры в виде квадратов с длиной стороны 1000 и 500  $\mu\text{m}$  (вид сверху) до (a) и после отжига в воздухе при температуре 1000°C в течение 2 (b) и 8 (c) ч.



**Рис. 5.** Зависимость пропускания отдельных квадратов многослойных структур от длины волны для различных значений энергии импульса. Длительность импульса 300 fs, частота повторений 500 kHz, скорость перемещения подвижной платформы 375  $\mu\text{m/s}$ , NA = 0.25.

этом режиме степень однородности модификаций падает при уменьшении энергии импульса. Преимуществом записи при низких значениях энергии является получение наименьшего значения фазового сдвига, что необходимо для создания оптических элементов, состоящих из многослойных структур, с контролируемым итоговым значением фазового сдвига. В качестве предпочтительного режима записи был выбран режим с длительностью импульсов 300 fs, частотой повторений 500 kHz и NA = 0.25 (фиолетовая кривая на рис. 1), позволяющий записывать однородные структуры с низким значением фазового сдвига. Скорость перемещения моторизированной платформы не задавалась выше 375  $\mu\text{m/s}$ , так как дальнейшее

увеличение скорости приводило к деградации качества записи из-за менее точного позиционирования образца. Для записи структур на больших скоростях требуется более точная система позиционирования.

Графики пропускания отдельных записанных областей в зависимости от разных значений энергии импульса (рис. 3) демонстрируют уменьшение величины пропускания во всем видимом диапазоне при повышении энергии импульса, так как это увеличивает дефектность записываемых структур и приводит к более сильному рассеиванию света на структурах. При этом уменьшение скорости перемещения платформы ниже определенного порогового значения также существенно понижает значение пропускания, что связано с достижением слишком большого числа импульсов в точку при записи структур, что приводит к увеличению плотности модификаций.

В настоящей работе были определены параметры записи в плавленом кварце структур, обладающих пропусканием более 0.9 и величиной фазового сдвига менее 25 nm (фиолетовая кривая на рис. 1, 3). Запись нескольких слоев подобных структур позволила достичь более высокой однородности итоговой структуры (рис. 4), сохранив при этом значение пропускания выше 0.8 arb.units (зеленая кривая на рис. 5), необходимое для успешного применения созданных на основе подобных структур оптических элементов в прикладных задачах. Многослойный характер итоговой структуры лишь незначительно уменьшил величину пропускания. При этом последующий отжиг образца с записанными структурами позволил избавиться от возникающих при записи нежелательных эффектов, связанных с напряжениями материала в объеме вокруг записанных структур (рис. 4). Возникновение напряжений материала вызвано близким расположением слоев друг к другу. Устойчивость к нагреву подобных наноструктур объясняется тем, что химическая рекомбинация кислорода, молекулы которого участвуют в создании этих структур, возможна только при температуре выше 1200°C [13,17,18].

## Заключение

В ходе настоящей работы был исследован процесс записи двулучепреломляющих структур в объеме плавленого кварца с помощью сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов. Была проанализирована зависимость характеристик записываемых структур от параметров лазерной записи. Показано, что комбинация записи многослойных структур с последующим отжигом позволяет получить структуры с высокой степенью однородности, значением фазового сдвига менее 25 nm и пропусканием выше 0.8.

## Финансирование работы

Авторы признательны Российскому научному фонду за финансовую поддержку данных исследований в рамках проекта 20-71-10103.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M. Beresna, M. Gecevičius, P.G. Kazansky. *Opt. Mater. Express*, **1**, 783–795, (2011). DOI: 10.1364/OME.1.000783
- [2] А.Е. Рупасов, П.А. Данилов, М.П. Смаев, М.С. Ковалев, А.С. Золотко, А.А. Ионин, С.И. Кудряшов. *Опт. и спектр.*, **128** (7), 918 (2020). DOI: 10.21883/OS.2020.07.49564.48-20
- [3] R. Stoian. *Appl. Phys. A*, **126**, 438 (2020). DOI: 10.1007/s00339-020-03516-3
- [4] L. Rapp, R. Meyer, R. Giust, L. Furfaro, M. Jacquot, P.A. Lacourt, J.M. Dudley, F. Courvoisier. *Sci. Rep.*, **6**, 34286 (2016). DOI: 10.1038/srep34286
- [5] S. Lavin-Varela, S. Madden, K. Yan, M. Ploschner, A.V. Rode, L. Rapp. *Opt. Express*, **30**, 6016–6036 (2022). DOI: 10.1364/OE.449230
- [6] S. Xu, H. Fan, Z.-Z. Li, J.-G. Hua, Y.-H. Yu, L. Wang, Q.-D. Chen, H.-B. Sun. *Opt. Lett.*, **46**, 536–539 (2021). DOI: 10.1364/OL.413177
- [7] S.I. Kudryashov, P.A. Danilov, M.P. Smaev, A.E. Rupasov, A.S. Zolot'ko, A.A. Ionin, R.A. Zakoldaev. *JETP Lett.*, **113**, 493–497 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021080075
- [8] S.I. Kudryashov, P.A. Danilov, A.E. Rupasov, M.P. Smayev, A.N. Kirichenko, N.A. Smirnov, A.A. Ionin, A.S. Zolot'ko, R.A. Zakoldaev. *Appl. Surf. Sci.*, **568**, 150877 (2021). DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.150877
- [9] M. Sakakura, Y. Lei, L. Wang, Y.-H. Yu, P.G. Kazansky. *Light Sci. Appl.*, **9**, 15 (2020). DOI: 10.1038/s41377-020-0250-y
- [10] G. Shayeganrad, X. Chang, H. Wang, C. Deng, Y. Lei, P.G. Kazansky. *Opt. Express*, **30**, 41002–41011 (2022). DOI: 10.1364/OE.473469
- [11] J. del Hoyo, R. Meyer, L. Furfaro, F. Courvoisier. *Nanophotonics*, **10**, 1089–1097 (2021). DOI: 10.1515/nanoph-2020-0457
- [12] C. Vetter, R. Giust, L. Furfaro, C. Billet, L. Froehly, F. Courvoisier. *Materials*, **14**, 6749 (2021). DOI: 10.3390/ma14226749
- [13] M. Lancry, B. Poumellec, J. Canning, K. Cook, J.-C. Poulin, F. Brisset. *Laser Photonics Rev.*, **7**, 953–962 (2013). DOI: 10.1002/lpor.201300043
- [14] I.V. Gritsenko, M.S. Kovalev, N.G. Stsepuro, Y.S. Gulina, G.K. Krasin, S.A. Gonchukov, S.I. Kudryashov. *Laser Phys. Lett.*, **19**, 076201 (2022). DOI: 10.1088/1612-202X/ac7136
- [15] M. Beresna, M. Gecevičius, P.G. Kazansky, T. Gertus. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 201101 (2011). DOI: 10.1063/1.3590716
- [16] R. Drevinskas, P.G. Kazansky. *APL Photonics*, **2**, 066104 (2017). DOI: 10.1063/1.4984066
- [17] E. Bricchi, P.G. Kazansky. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 111119 (2006). DOI: 10.1063/1.2185587
- [18] Y. Wang, M. Cavillon, N. Ollier, B. Poumellec, M. Lancry. *Phys. Status Solidi A*, **218**, 2100023 (2021). DOI: 10.1002/pssa.202100023