

Формирование четвертьволновой фазовой пластинки в объеме плавленого кварца методом фемтосекундной лазерной записи

© П.А. Данилов^{1,2}, Г.К. Красин¹, А.Е. Рупасов¹, А.В. Горевой¹, М.С. Ковалев^{1,2},
И.Н. Мушкарина^{1,2}, А.С. Комшин², С.И. Кудряшов^{1,2}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева,
Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

e-mail: danilovpa@lebedev.ru

Поступила в редакцию 22.10.2025 г.

В окончательной редакции 12.12.2025 г.

Принята к публикации 21.02.2026 г.

Методом прямой лазерной записи фемтосекундными импульсами внутри пластины плавленого кварца сформирован трехмерный микрооптический элемент, работающий как четвертьволновая фазовая пластинка на длине волны 633 нм. Показано, что индуцированное двулучепреломление ($\Delta n \approx 3 \cdot 10^{-4}$) обусловлено формированием анизотропной модификации, сопровождающейся генерацией кислородно-дефицитных и немостиковых кислородно-дырочных дефектных центров. Спектроскопия фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света подтвердила равномерное распределение дефектов по модифицированной области и локальную перестройку аморфной матрицы SiO₂. Установлено высокое пропускание (60–80%) в диапазоне 600–1100 нм и высокие потери в УФ видимом диапазоне, обусловленные рассеянием света. Показано, что положение области максимальной модификации смещено относительно геометрической фокальной плоскости вследствие нелинейного эффекта самофокусировки, что подтверждено количественной оценкой положения нелинейного фокуса. Полученные результаты демонстрируют возможность создания функциональных поляризационных элементов в объеме диэлектриков с контролируемыми оптическими и структурными свойствами.

Ключевые слова: плавленый кварц, трехмерные микрооптические элементы, филаментация, ультракороткие лазерные импульсы, волновая пластинка.

DOI: 10.61011/OS.2026.02.62692.8687-25

Введение

Современные технологии прямой лазерной записи (ПЛЗ) ультракороткими импульсами позволили достичь беспрецедентного уровня контроля над формированием трехмерных оптических структур в прозрачных диэлектриках. Благодаря высокой пиковой мощности фемтосекундных лазерных импульсов энергия может быть локализована в малом объеме материала с нанометровой точностью, при этом время вложения энергии значительно короче характерных времен тепловой диффузии и электрон-фононной релаксации. Это обеспечивает минимальное тепловое повреждение окружающего материала и позволяет реализовывать высококачественную модификацию даже в материалах с широким окном прозрачности, таких как плавленый кварц, сапфир, алмаз, полимерные диэлектрики и др. [1–3]. Многофотонная ионизация, инициируемая интенсивным излучением в пределах фокального объема, обеспечивает эффективную передачу энергии в кристаллическую или аморфную решетку без значительных оптических потерь, что делает ПЛЗ особенно привлекательной технологией для создания элементов фотонных интегральных схем, оптической памяти и функциональных микроструктур, управляющих

различными свойствами света: амплитудой, фазой, поляризацией и спектральным составом [4–6].

Особое место среди прозрачных диэлектриков занимает плавленый кварц — материал, сочетающий высокую термо- и радиационную стойкость с широким диапазоном прозрачности (0.3–2.0 мкм). При фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов в его объеме могут формироваться различные типы микромодификаций: изотропное изменение показателя преломления (Тип I), двулучепреломляющие субволновые решетки и нанопоры (Тип II/X), а также микрополости (Тип III) [7–11]. Физические механизмы, лежащие в основе формирования таких наноструктур, до сих пор остаются предметом активных исследований. Среди наиболее обсуждаемых моделей — интерференция падающего лазерного поля с плазменной волной, локальное усиление электромагнитного поля, самозахват излучения и интерференция экситон-поляритонов [12–17]. Эти процессы приводят к структурной перестройке материала и образованию дефектных центров, таких как кислородно-дефицитные центры (ODC) и немостиковые кислородно-дырочные центры (NBOHC), которые определяют как оптические, так и спектральные свойства модифицированных областей [18].

Управление параметрами лазерного излучения — длиной волны, длительностью импульса, поляризацией и энергией — позволяет тонко настраивать морфологию наноструктуры, оптическую анизотропию и прозрачность записываемых областей микромодификации. Это открывает возможности для создания трехмерных массивов нанорешеток с заданными функциональными характеристиками, включая волновые пластинки, поляризационные элементы, цветные микрофильтры и нелинейно-оптические метаповерхности [19–25].

В настоящей работе методом прямой лазерной записи в объеме плавленного кварца сформирован компактный ($3 \times 3 \times 0.5$ мм) оптический элемент, работающий как четвертьволновая фазовая пластинка на длине волны 633 нм. Двулучепреломление, обусловленное наведенной оптической анизотропией, обеспечивает требуемый фазовый набег между ортогональными поляризационными компонентами. Проведено комплексное исследование спектральных и поляризационных характеристик элемента в диапазоне 200–1000 нм, а также проанализированы спектральные потери в ультрафиолетовом (УФ) и видимом диапазоне, связанные с рассеянием света на структурных дефектах. Показано, что в процессе лазерной модификации происходит перестройка кристаллической решетки кварца с локальным разрывом Si–O–Si-связей и генерацией ODC- и NBOHC-дефектов.

Экспериментальная часть

Формирование микроструктурированного оптического элемента в объеме плавленного кварца осуществлялось методом ПЛЗ с использованием фемтосекундной волоконной иттербиевой лазерной системы Satsuma (Amplitude Systèmes). Лазер генерировал импульсы длительностью 300 fs при максимальной энергии в импульсе до 10 мкДж и регулируемой частоте следования в диапазоне 1 Hz–500 kHz. Образцы представляли собой пластины из синтетического плавленного кварца (Suprasil 300, Heraeus) толщиной 2 мм.

Лазерное излучение фокусировалось в объем образца на глубину 730 мкм с помощью микрообъектива (ЛОМО) с числовой апертурой $NA = 0.1$. Расчетный радиус фокального пятна (по уровню $1/e^2$ интенсивности) составил 3.3 ± 0.4 мкм. Перемещение образца относительно фокусированного пучка записывающего фемтосекундного лазерного излучения осуществлялось с помощью прецизионного двухкоординатного столика Н1Р4А (Prior Scientific). Используемый позиционер обеспечивает точность позиционирования не хуже ± 0.5 мкм с воспроизводимостью перемещения не хуже ± 0.2 мкм. Скорость сканирования задавалась программно и составляла 500 мкм/с. Стабильность скорости в диапазоне от 10 мкм/с до нескольких мм/с находилась в пределах $\pm 1\%$ от заданного значения. Запись структуры производилась в один слой при энергии импульса 2 мкДж, частоте следования 500 kHz. Структура представляла

собой массив из 500 параллельных линий длиной 3 мм с периодом 6 мкм. При указанных параметрах сканирования и фокусировки в каждую точку фокуса попадало в среднем $N = 1.3 \cdot 10^4$ импульсов, а перекрытие соседних импульсов перпендикулярно направлению сканирования (ось Y) составляло около 10%.

Оптические свойства записанного элемента исследовались с помощью поляризационного оптического микроскопа Zeiss Axioskop 40 (Carl Zeiss AG). Спектральные характеристики пропускания и поглощения образца в диапазоне 200–1100 нм регистрировались на двойном монохроматоре СФ-2000 (ОКБ Спектр). Для трехмерной визуализации модифицированных областей и анализа люминесцентных свойств использовался конфокальный лазерный сканирующий микроскоп Confotec MR520 (Sol Instruments). Возбуждение люминесценции осуществлялось на длинах волн 405 нм и 532 нм; сбор сигнала проводился через объектив Nikon с числовой апертурой $NA = 0.3$ и увеличением $10\times$. Величина оптической разности хода, обусловленной двулучепреломлением записанной микроструктуры, измерялась с помощью компенсационного поляриметра LCC7201 (Thorlabs) при облучении элемента линейно поляризованным гелий-неоновым лазером ($\lambda = 633$ нм). Период записанной структуры определялся по положению дифракционных максимумов, возникающих при прохождении непрерывного излучения от полупроводникового лазера (Cobolt 06-MLD, HÜBNER Photonics; $\lambda = 660$ нм, мощность 100 мВт) через образец. Угловое положение дифракционных максимумов регистрировалось с помощью CCD-камеры и использовалось для расчета периода структуры на основе уравнения дифракционной решетки.

Результаты и обсуждение

Оптические свойства

На рис. 1, *a* представлено оптическое изображение микрооптического элемента, сформированного в объеме плавленного кварца методом ПЛЗ. Макроскопически структура выглядит однородной и не содержит видимых трещин или разрушений; однако по краям наблюдается незначительная волнистость, обусловленная накопленной погрешностью позиционирования сканирующей системы в процессе записи. При наблюдении в скрещенных поляризаторах (рис. 1, *b*) в модифицированной области проявляется неоднородное двулучепреломление, что свидетельствует о наличии анизотропной внутренней структуры. При увеличении (рис. 1, *c, d*) становится отчетливо видно, что область микромодификации состоит из параллельных линий с периодом около 6 мкм. Высокорастворяющая микроскопия (рис. 1, *d*) выявляет наличие микрополостей, равномерно распределенных по всей записанной области. Такие полости возникают при

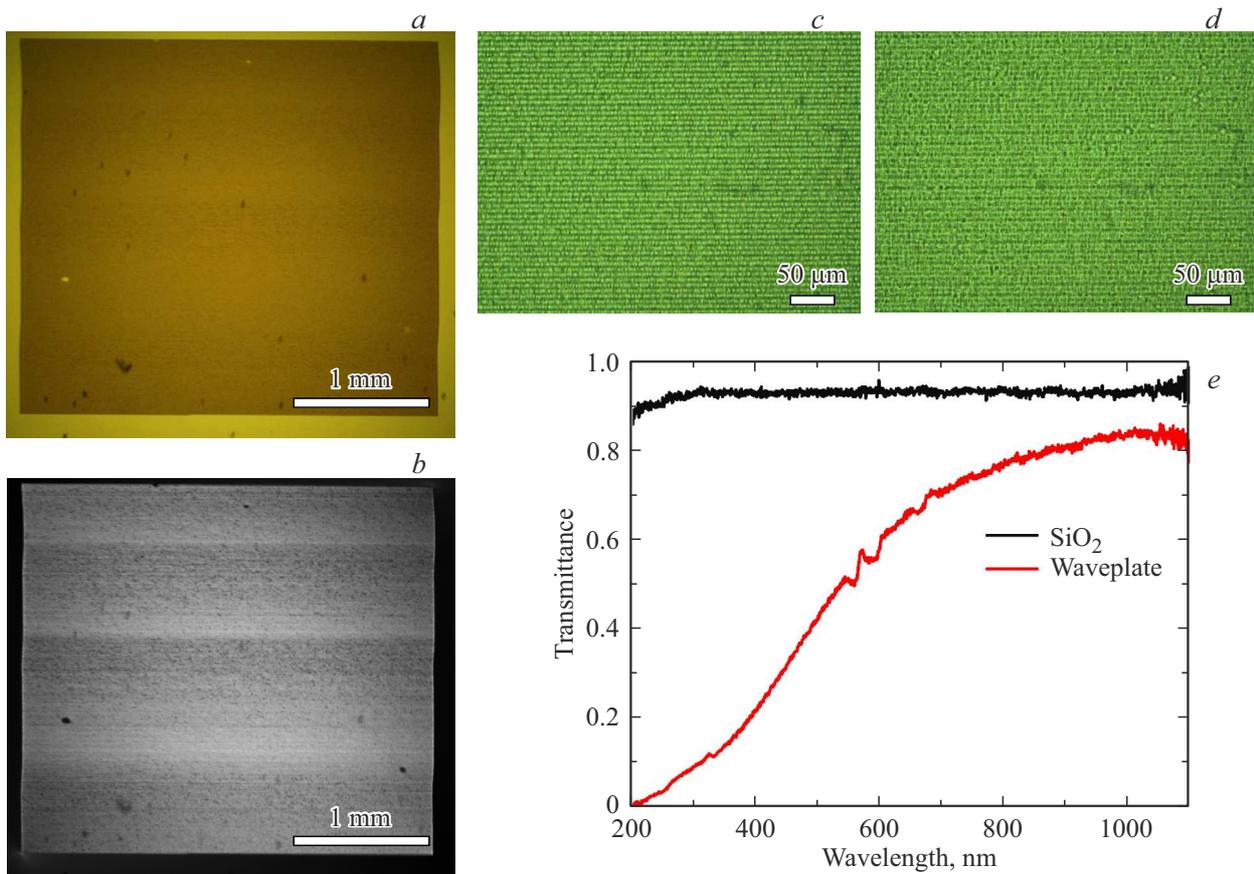


Рис. 1. Изображения и спектры пропускания оптического элемента в объеме плавленого кварца. (а) Объектив с увеличением $5\times$, подсветка снизу, без использования поляризаторов; (б) объектив с увеличением $5\times$, подсветка снизу, скрещенные поляризаторы; (с) объектив с увеличением $40\times$, подсветка снизу, без использования поляризаторов, глубина $600\ \mu\text{m}$; (д) объектив с увеличением $40\times$, подсветка снизу, без использования поляризаторов, глубина $550\ \mu\text{m}$; (е) спектры пропускания оптического элемента по сравнению с немодифицированным плавленым кварцем.

высокой плотности энергии лазерного излучения и свидетельствуют о локальном испарении или разрежении материала в фокальной зоне.

Для количественной оценки периодичности структуры проведено исследование ее дифракционных свойств. Через образец пропускали непрерывное лазерное излучение ($\lambda = 660\ \text{nm}$, мощность $100\ \text{mW}$, диаметр пучка $2\ \text{mm}$) и регистрировали дифракционную картину на экране. Угол отклонения первого дифракционного максимума относительно нормали к поверхности позволил рассчитать период структуры по формуле дифракционной решетки $d = n\lambda / \sin \theta$. Полученное значение периода составило $T = 6.0 \pm 0.3\ \mu\text{m}$, что согласуется с диаметром пятна сфокусированного лазерного излучения. Однако дифракционная эффективность в первом порядке оказалась низкой — менее 4%. Это указывает на то, что сформированная структура не может быть эффективно использована в качестве классической дифракционной решетки, что, вероятно, связано с частичным повреждением области микромодификации и наличием микрополостей, нарушающих регулярность фазового профиля.

Несмотря на наличие микроструктуры, вызывающей дополнительное рассеяние, оптический элемент демонстрирует достаточно высокое пропускание в видимом и ближнем ИК диапазоне: 60–80% в интервале длин волн 600–1100 nm (рис. 1, е). При уменьшении длины волны меньше 600 nm наблюдается резкое падение пропускания, достигающее практически нулевых значений в глубоком ультрафиолете (200–300 nm). Такое поведение типично для плавленого кварца, подвергнутого интенсивному фемтосекундному лазерному облучению, и может быть обусловлено образованием кислородных дефектных центров — в первую очередь ODC и NBOHC, которые обладают интенсивными полосами поглощения в УФ области [21]. Действительно, спектр поглощения кислородно-дефицитных центров (ODC) имеет наиболее интенсивные полосы в глубоком ультрафиолете (максимумы при $\sim 160\text{--}180\ \text{nm}$ и слабая широкая полоса вблизи $240\text{--}250\ \text{nm}$), а нестиковые кислородно-дырочные центры (NBOHC) проявляют характерную полосу поглощения в видимой области ($\sim 620\ \text{nm}$). Спектр пропускания модифицированного кварца демонстрирует монотонное уменьшение пропускания при $\lambda < 600\ \text{nm}$

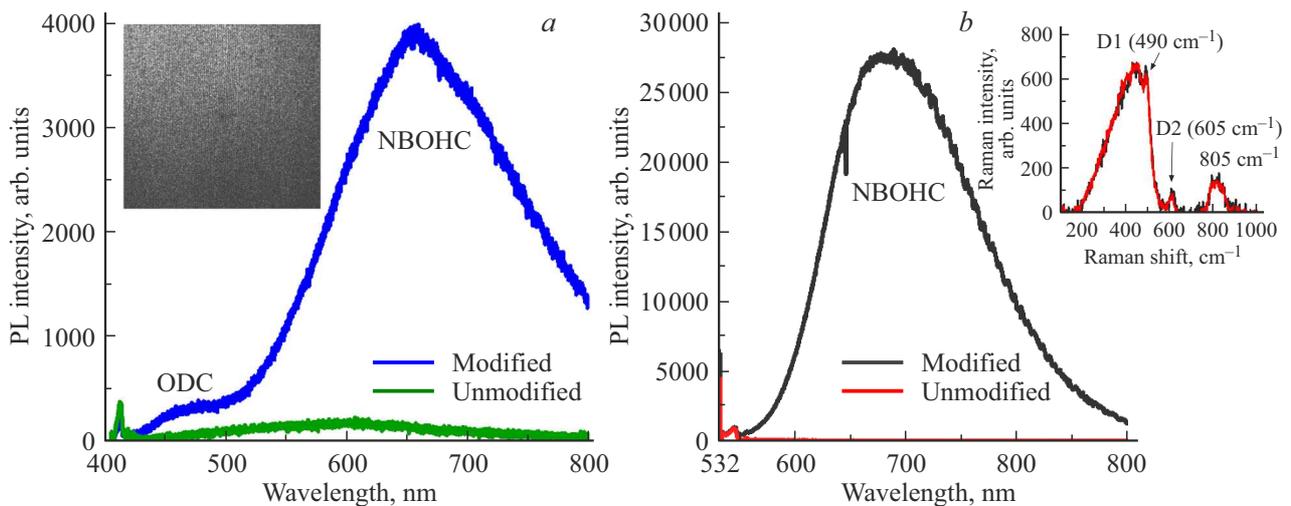


Рис. 2. ФЛ кислородных дефектов ODC и NBOHC в плавленом кварце при накачке непрерывным лазерным излучением с длинами волн 405 (а) и 532 нм (b). На вставках обозначены люминесцентная карта размером 1×1 мм для области микромодификации в четвертьволновой пластинке (рис. 2, а) и спектр комбинационного рассеяния в диапазоне $0-1000$ cm^{-1} (рис. 2, b).

(рис. 1, e), что, вероятнее всего, обусловлено рассеянием света на неоднородностях, возникающих при ПЛЗ. Поглощение на длинах волн, соответствующих электронным переходам в кислородных дефектных центрах, может вносить дополнительный вклад в общие потери вблизи полос ~ 250 нм (ODC) и ~ 620 нм (NBOHC). Однако спектральная зависимость пропускания не демонстрирует выраженных аномалий, характерных для селективного поглощения в указанных полосах ODC и NBOHC, что говорит о второстепенном вкладе поглощения по сравнению с рассеянием в исследуемом спектральном диапазоне.

Наличие высоких потерь в пропускании при $\lambda < 600$ нм ограничивает применимость элемента в коротковолновом диапазоне. В то же время известно, что термический отжиг при температурах $\sim 900^\circ\text{C}$ способен частично восстановить структуру кварца, снижая концентрацию дефектов и, как следствие, уровень рассеяния и поглощения. Однако такой отжиг одновременно приводит к уменьшению величины индуцированного двулучепреломления, что критично для функциональности фазовых элементов [21]. В настоящей работе термообработка не применялась, чтобы сохранить максимальную анизотропию, необходимую для работы элемента в качестве четвертьволновой пластинки. Таким образом, сформированная структура представляет собой компромисс между оптической однородностью, эффективностью двулучепреломления и спектральными потерями, обусловленными рассеянием и лазерно-индуцированными дефектами. Дальнейшая оптимизация параметров записи (в частности, энергии импульса и скорости сканирования) может позволить снизить степень разрушения материала и соответственно величину рассеяния света на неоднородностях и повысить как пропускание, так и функциональную эффективность элемента.

Спектральные измерения

Для выявления лазерно-индуцированных структурных и дефектных изменений в плавленом кварце проведены спектроскопические исследования комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ) с возбуждением непрерывным лазерным излучением (рис. 2).

При накачке на длине волны 405 нм спектр ФЛ в модифицированной области характеризуется выраженным увеличением интенсивности в двух полосах с максимумами при 450 и 650 нм (рис. 2, а). Эти полосы традиционно ассоциируются с радиационными дефектами в кварце: коротковолновая компонента (~ 450 нм) связана с ODC, а длинноволновая (~ 650 нм) — с NBOHC [20]. Для оценки пространственного распределения NBOHC-дефектов была получена люминесцентная карта размером 1×1 мм в режиме быстрого конфокального сканирования по интенсивности эмиссии на длине волны 650 нм. Карта (вставка на рис. 2, а) демонстрирует высокую однородность сигнала, что свидетельствует о равномерном распределении NBOHC по всей записанной области, включая границы между светлыми и темными полосами, наблюдаемыми в скрещенных поляризаторах (рис. 1, b). При возбуждении на длине волны 532 нм люминесценция NBOHC-центров становится доминирующей и превышает фоновый сигнал от немодифицированного кварца более чем на два порядка (рис. 2, b). Это подтверждает высокую концентрацию данных дефектов в облученной зоне и указывает на их ключевую роль в формировании оптических свойств структуры.

Анализ спектров КРС в диапазоне $0-1000$ cm^{-1} (вставка на рис. 2, b) проводился после вычитания вклада люминесценции и нормировки на интенсивность фонового сигнала. В спектре плавленого кварца наблюдаются характерные полосы: широкая R-полоса с

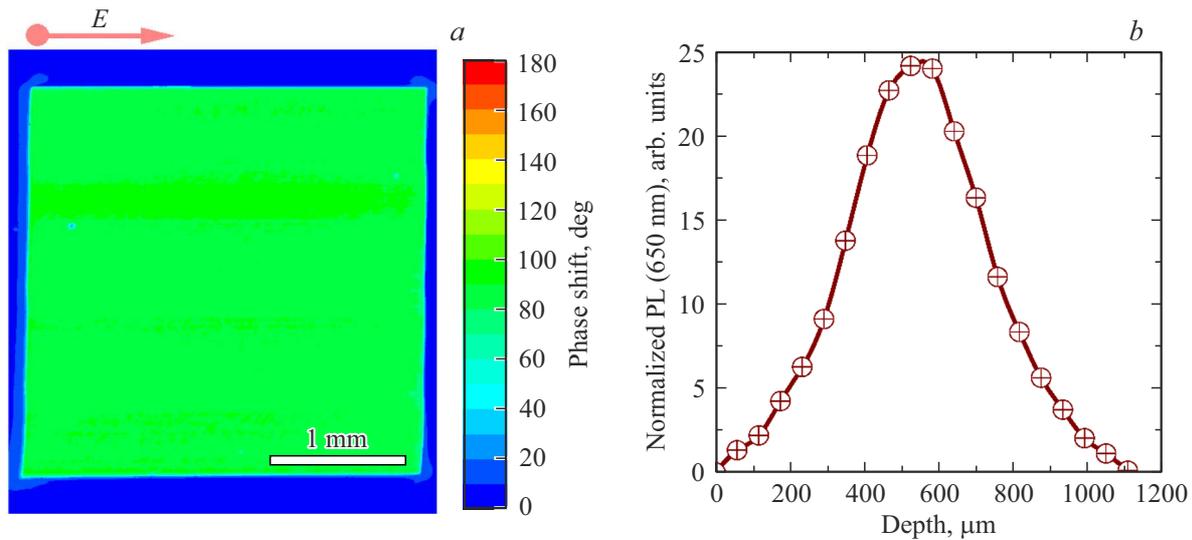


Рис. 3. Псевдоцветовая карта, показывающая распределение величины фазового сдвига при прохождении излучения с длиной волны 633 нм через четвертьволновую пластинку, записанную в объеме плавленого кварца.

максимумом около 440 cm^{-1} , обусловленная изгибными колебаниями связей Si–O–Si, пики D_1 (490 cm^{-1}) и D_2 (605 cm^{-1}), связанные с симметричными колебаниями трех- и четырехчленных колец SiO_4 , а также полоса при $\sim 805 \text{ cm}^{-1}$, соответствующая локальным деформациям (растяжению и изгибу) мостиковых Si–O–Si-связей [26]. После лазерной модификации интенсивности полос D_1 , D_2 и 805 cm^{-1} , нормированные по R -полосе, демонстрируют незначительное, но воспроизводимое увеличение. Это указывает на частичное нарушение среднего порядка в аморфной сети кварца и локальное изменение геометрии SiO_4 -тетраэдров.

В совокупности данные спектроскопии КРС и ФЛ свидетельствуют о том, что основные структурные трансформации при фемтосекундной лазерной записи связаны с разрывом мостиковых Si–O–Si-связей и последующим образованием точечных дефектов — ODC и NBOHC. Именно эти дефекты определяют как спектральные потери в УФ области, так и проявление двулучепреломления за счет формирования анизотропной наноструктуры. Отсутствие значительных изменений в R -полосе говорит о сохранении общей аморфной матрицы кварца, тогда как усиление D -полос отражает локальную перестройку кольцевой структуры сети.

Двулучепреломление

Для количественной оценки фазового сдвига, индуцированного лазерной записью, проведены измерения двулучепреломления с помощью компенсационного поляриметра LCC7201 (Thorlabs). Излучение гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda = 633 \text{ nm}$ использовалось в качестве зондирующего. Результаты измерений (рис. 3, *a*) демонстрируют однородное распределение фазового сдвига по всей площади модифицированной

области: $\Delta\phi = 90^\circ \pm 10^\circ$. Такое значение соответствует четвертьволновой задержке между ортогональными поляризационными компонентами, что подтверждает функциональность сформированной структуры в качестве фазовой пластинки. Наблюдаемое двулучепреломление обусловлено формированием анизотропной модификации, которая, согласно современным исследованиям [7–11,13,15,23], представляет собой субволновую решетку из чередующихся нанополос с различной плотностью. Ориентация полос перпендикулярна направлению поляризации записывающего лазерного излучения [13,15,23]. Такая структура обладает эффективной оптической анизотропией: показатель преломления вдоль нанополос, параллельных поляризации лазерного излучения в процессе записи, отличается от показателя преломления в ортогональном направлении, что приводит к двулучепреломлению, наблюдаемому в настоящей работе. Поскольку в дефектах такого типа показатель преломления выше вдоль направления поляризации, то в сформированной в объеме плавленого кварца четвертьволновой пластинке (рис. 3, *a*) ось с большим показателем преломления (медленная ось) совпадает с направлением сканирования (ось X).

Для оценки величины двулучепреломления Δn_{633} использовалось соотношение $\Delta n_{633} = R/L$, где $R = \lambda\Delta\phi/(2\pi)$ — оптическая разность хода, а L — эффективная толщина модифицированного слоя. Поскольку прямое оптическое определение L затруднено из-за слабого контраста в немодифицированном кварце, толщина структуры была определена по профилю ФЛ NBOHC-центров ($\lambda = 650 \text{ nm}$) при возбуждении на длине волны 532 нм. Интенсивность ФЛ пропорциональна концентрации дефектов и, следовательно, отражает пространственное распределение лазерно-индуцированной модификации вдоль оптической оси.

Как видно из рис. 3, *b*, профиль ФЛ имеет выраженный максимум на глубине $z \approx 560 \pm 20 \mu\text{m}$, а ширина по уровню половины максимума (FWHM) составляет $L = 420 \pm 20 \mu\text{m}$. Подставляя $\Delta\phi = \pi/2$ и $L = 420 \mu\text{m}$ в выражение для Δn_{633} , получаем $\Delta n_{633} \approx 3 \cdot 10^{-4}$.

Это значение согласуется с типичными величинами двулучепреломления, достигаемыми при записи нанорешеток в кварце с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Примечательно, что положение максимума ФЛ ($z \approx 560 \pm 20 \mu\text{m}$) заметно отличается от заданной глубины фокусировки $z_f = 730 \mu\text{m}$. Данное смещение объясняется нелинейным эффектом самофокусировки, возникающим при высокой пиковой мощности лазерных импульсов. Энергия импульса при записи составляла $E_0 = 2 \mu\text{J}$, длительность — 300 fs, что соответствует пиковой мощности $P \approx 6.7 \text{ MW}$. Для плавленого кварца при длине волны 1030 nm критическая мощность самофокусировки оценивается как $P_{\text{cr}} \approx 4.5 \text{ MW}$ [27], при этом для $P > P_{\text{cr}}$ возникают условия для формирования нелинейного фокуса внутри материала.

Положение нелинейного фокуса z_{sf} может быть оценено по модифицированной модели самофокусировки [28]:

$$z_{\text{sf}} = \frac{k(I_0)\omega^2/2}{\sqrt{P/P_c - 1} + 2z_f/(k(I_0)\omega_0^2)}, \quad (1)$$

где $k(I_0) = 2\pi n(I_0)/\lambda$ — волновое число, зависящее от интенсивности, $n(I_0) = n_0 + n_2 I_0$ — нелинейный показатель преломления, ω_0 — радиус пучка в фокальной плоскости, $I_0 = 4E_0\sqrt{\ln 2}/(\pi^{3/2}\omega_0^2\tau)$ — пиковая интенсивность, $z_f = 730 \mu\text{m}$ — геометрическая глубина фокусировки. Подстановка экспериментальных параметров в уравнение (1) дает $z_{\text{sf}} \approx 620 \mu\text{m}$, что находится в согласии с положением максимума ФЛ ($560 \pm 20 \mu\text{m}$). Таким образом, наблюдаемое смещение зоны максимальной модификации является прямым следствием нелинейной самофокусировки лазерного излучения в диэлектрике. Этот результат подчеркивает необходимость учета нелинейных оптических эффектов при проектировании трехмерных оптических элементов методом прямой лазерной записи, особенно в режимах, близких к порогу разрушения материала.

Заключение

Методом фемтосекундной лазерной записи внутри пластины плавленого кварца сформирована однородная объемная двулучепреломляющая структура с величиной разности показателей преломления $\Delta n \approx 3 \cdot 10^{-4}$, работающая как четвертьволновая фазовая пластинка на длине волны 633 nm. Спектроскопия пропускания показала, что ключевую роль в определении эффективности работы сформированного методом ПЛЗ элемента играют полости и неоднородности, формирование которых значительно увеличивает потери на

рассеяние света в УФ видимом спектральном диапазоне. Кроме того, исследования ФЛ и КРС элемента показывают, что процесс модификации сопровождается генерацией ОДС- и НВОНС-дефектов, которые являются индикаторами структурных изменений кристаллической решетки кварца и локального разрыва Si–O–Si-связей. Смещение зоны максимальной модификации относительно геометрической фокальной плоскости ($z = 730 \mu\text{m} \rightarrow z \approx 560 \pm 20 \mu\text{m}$) объяснено нелинейной самофокусировкой, что подтверждено количественной оценкой положения нелинейного фокуса. Результаты демонстрируют потенциал прямой лазерной записи для создания объемных поляризационных элементов при условии учета нелинейных эффектов и оптимизации режимов облучения

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания № FSN-2025-0009.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Sugioka, Y. Cheng. Appl. Phys. Rev., **1**(4), (2014). DOI: 10.1063/1.4904320
- [2] S.M. Eaton, J.P. Hadden, V. Bharadwaj, J. Forneris, F. Picollo, F. Bosia, B. Sotillo, A.N. Giakoumaki, O. Jedrkiewicz, A. Chiappini, M. Ferrari, R. Osellame, P.E. Barclay, P. Olivero, R. Ramponi. Adv. Quantum Technol., **2**(5,6), 1900006 (2019). DOI: 10.1002/qute.201900006
- [3] K.C. Phillips, H.H. Gandhi, E. Mazur, S.K. Sundaram. Adv. Opt. Photonics, **7**(4), 684 (2015). DOI: 10.1364/AOP.7.000684
- [4] S.I. Stopkin, A.S. Lipatiev, Yu.V. Mikhailov, S.S. Fedotov, T.O. Lipateva, V.N. Sigaev. Glass Ceram., **82**(5), 177 (2025). DOI: 10.1007/s10717-025-00768-4
- [5] N.N. Skryabin, S.A. Zhuravitskii, I.V. Dyakonov, S.S. Straupe, A.A. Kalinkin, S.P. Kulik. Phys. Rev. Appl., **22**(6), 064079 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.22.064079
- [6] R. Drevinskas, P.G. Kazansky. APL Photonics, **2**(6), 066104 (2017). DOI: 10.1063/1.4984066
- [7] M. Watanabe, H. Sun, S. Joudkazis, T. Takahashi, S. Matsuo, Y. Suzuki, J. Nishii, H. Misawa. Jpn. J. Appl. Phys., **37**(12B), L1527 (1998). DOI: 10.1143/JJAP.37.L1527
- [8] Y. Shimotsuma, K. Hirao, J. Qiu, P.G. Kazansky. Mod. Phys. Lett. B, **19**(5), 225 (2005). DOI: 10.1142/S0217984905008281
- [9] K.M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, K. Hirao. Opt. Lett., **21**(21), 1729 (1996). DOI: 10.1364/OL.21.001729
- [10] W. Yang, E. Bricchi, P.G. Kazansky, J. Bovatsek, A.Y. Arai. Opt. Express, **14**(21), 10117 (2006). DOI: 10.1364/OE.14.010117
- [11] H. Wang, Y. Lei, L. Wang, M. Sakakura, Y. Yu, G. Shayeganrad, P.G. Kazansky. Laser Photonics Rev., **16**(4), 2100563 (2022). DOI: 10.1002/lpor.202100563

- [12] R. Stoian. *Appl. Phys. A*, **126** (6), 438 (2020). DOI: 10.1007/s00339-020-03516-3
- [13] N.M. Bulgakova, V.P. Zhukov, Y.P. Meshcheryakov. *Appl. Phys. B*, **113**(3), 437 (2013). DOI: 10.1007/s00340-013-5488-0
- [14] 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
- [15] A. Rudenko, J.P. Colombier, T.E. Itina. *Phys. Rev. B*, **93** (7), 075427 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.075427
- [16] M. Beresna, M. Gecevičius, P.G. Kazansky, T. Taylor, A.V. Kavokin. *Appl. Phys. Lett.*, **101** (5), 053120 (2012). DOI: 10.1063/1.4742899
- [17] Ю.С. Гулина, А.Е. Рупасов, Г.К. Красин, Н.И. Буслеев, И.В. Гриценко, А.В. Богацкая, С.И. Кудряшов. Письма в ЖЭТФ, **119** (9), 638 (2024). DOI: 10.31857/S1234567824090027 [Y.S. Gulina, A.E. Rupasov, G.K. Krasin, N.I. Busleev, I.V. Gritsenko, A.V. Bogatskaya, S.I. Kudryashov. *JETP Lett.*, **119** (9), 652 (2024). DOI: 10.1134/S0021364024601003].
- [18] A.V. Bogatskaya, E.A. Volkova, A.M. Popov. *Appl. Phys. A*, **131** (1), 79 (2025). DOI: 10.1007/s00339-024-08192-1
- [19] S.I. Kudryashov, A.E. Rupasov, M.S. Kosobokov, A.R. Akhmatkhanov, G.K. Krasin, P.A. Danilov, B.I. Lisjikh, A. Abramov, E.D. Greshnyakov, E.V. Kuzmin, M.S. Kovalev, V.Y. Shur. *Nanomaterials*, **12** (23), 4303 (2022). DOI: 10.3390/nano12234303
- [20] K. Mishchik, C. D'Amico, P.K. Velpula, C. Maclair, A. Boukenter, Y. Ouerdane, R. Stoian. *J. Appl. Phys.*, **114** (13), 133502 (2013). DOI: 10.1063/1.4822313
- [21] G. Shayeganrad, X. Chang, H. Wang, C. Deng, Y. Lei, P.G. Kazansky. *Opt. Express*, **30** (22), 41002 (2022). DOI: 10.1364/OE.473469
- [22] S.I. Kudryashov, P.A. Danilov, A.E. Rupasov, M.P. Smayev, N.A. Smirnov, V.V. Kesaev, A.N. Putilin, M.S. Kovalev, R.A. Zakoldaev, S.A. Gonchukov. *Laser Phys. Lett.*, **19** (6), 065602 (2022). DOI: 10.1088/1612-202X/ac6806
- [23] Y. Shimotsuna, M. Sakakura, P.G. Kazansky, M. Beresna, J. Qiu, K. Miura, K. Hirao. *Adv. Mater.*, **22** (36), 4039 (2010). DOI: 10.1002/adma.201000921
- [24] M. Beresna, M. Gecevičius, P.G. Kazansky, T. Gertus. *Appl. Phys. Lett.*, **98** (20), 201101 (2011). DOI: 10.1063/1.3590716
- [25] R. Osellame, H.J.W.M. Hoekstra, G. Cerullo, M. Polinau. *Laser Photon. Rev.*, **5** (3), 442 (2011). DOI: 10.1002/lpor.201000031
- [26] N. Varkentina, M. Dussauze, A. Royon, M. Ramme, Y. Petit, L. Canioni. *Opt. Mater. Express*, **6** (1), 79 (2015). DOI: 10.1364/OME.6.000079
- [27] N. Vermeulen, D. Espinosa, A. Ball, J. Ballato, P. Boucaud, G. Boudebs, C.L.A.V. Campos, P. Dragic, A.S.L. Gomes, M.J. Huttunen, N. Kinsey, R. Mildren, D. Neshev, L.A. Padilha, M. Pu, R. Secondo, E. Tokunaga, D. Turchinovich, J. Yan, K. Yvind, K. Dolgaleva, E.W. Van Stryland. *J. Phys. Photon.*, **5** (3), 035001 (2023). DOI: 10.1088/2515-7647/ac9e2f
- [28] Ю.С. Гулина, Ц. Чжу, А.В. Горевой, Н.И. Долженко, П.А. Данилов, Е.Н. Римская, С.И. Кудряшов. Письма в ЖЭТФ, **122** (1), 36 (2025). DOI: 10.31857/S0370274X25070054 [Yu.S. Gulina, J. Zhu, A.V. Gorevoy, N.I. Dolzhenko, P.A. Danilov, E.N. Rimskaya, S.I. Kudryashov. *JETP Lett.*, **122** (1), 32 (2025). DOI: 10.1134/S0021364025607055].